

平成 21 年度環境省請負業務

平成 2 1 年度
廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務
調査報告書

平成 2 2 年 3 月

環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部

目次

頁

第1章 本調査の目的と概要

- 1.1 調査目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- 1.2 調査項目・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
- 1.3 検討委員会の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

第2章 石膏に係る基礎的知見の収集

- 2.1 石膏の物性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
- 2.2 化学石膏の組成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
- 2.3 廃石膏ボードの紙・石膏分離技術（破碎設備）の詳細・・・・・・・・ 18
- 2.4 石膏粉処理設備（加熱処理設備）の詳細・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
- 2.5 諸外国における廃石膏ボードの処分・リサイクル状況・・・・・・・・ 28

第3章 廃石膏粉の再利用用途及び改良後の基準

- 3.1 再利用分野の整理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
- 3.2 土木資材での再利用用途・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
- 3.3 再利用用途ごとの要求品質・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
- 3.4 再利用用途ごとの潜在需要量の推計・・・・・・・・・・・・・・・・ 50
- 3.5 再利用用途ごとの汎用されている資材・・・・・・・・・・・・・・・・ 54

第4章 地盤安定化資材としての活用に当たっての環境安全性の検討

- 4.1 地盤安定化資材製造事業者が行っている環境安全性の管理事例・・・・ 58
- 4.2 地盤に係る環境安全性管理方法の検討・・・・・・・・・・・・・・・・ 64
- 4.3 環境安全性の評価及び評価手法の検討・・・・・・・・・・・・・・・・ 77

第1章 本調査の目的と概要

1.1 調査目的

平成20年度に実施した石膏ボードの流通・処理状況及びリサイクルの動向等の調査によって、廃石膏ボードの再資源化の取組は、建設リサイクル法施行後、徐々に進行し、当初新築系廃石膏ボードのみ対象とした石膏ボードメーカーによるリサイクルの取組が、現在では解体系廃石膏ボード由来の石膏粉を原料とした取組（用途開発、実用化検討等）にまで発展していることが明らかとなった。

本年度においては、昨年度の現況調査で示された再資源化用途等の「市場」及び「その使用実態」を明らかにするとともに、検討委員会において各々の用途での「環境安全性に係る課題」と「環境安全性に係る評価指標等」の検討を行うこととし、将来の生活環境保全上の支障を考慮した廃石膏ボードの再資源化の有り方を提示することとする。

また、併せて、石膏に係る「物理化学的特性」、石膏ボード原料として使用され、フッ素等の供給源とされる「化学石膏の詳細」、廃石膏ボード「処理設備の現況」並びに欧米を中心とする「諸外国における処分・リサイクルの状況」について把握することとする。

1.2 調査項目

本調査は、次の項目について実施した。

(1) 石膏に係る基礎的知見の収集

石膏の結晶形ごとの物性や、加熱処理及び水和反応による結晶形の変化など石膏の基礎的性質について整理し、石膏ボードに使用される化学石膏の組成、廃石膏ボードの紙と石膏の分離技術、石膏粉処理設備について調査を行った。また、諸外国における廃石膏ボードの処分・リサイクル状況について調査を行った。

(2) 廃石膏粉の再利用用途及び改良後の基準

廃石膏の再利用用途を分野ごとに整理し、利用需要が大きいと想定される土木資材(地盤安定化資材、ため池堤体遮水材、アスファルト・フィラー)について詳細な調査を行った。用途ごとに製品として要求される品質や、廃石膏の利用可能量の推計、及び用途ごとに汎用されている製品の整理を行った。

(3) 地盤安定化資材としての活用に当たっての環境安全性の検討

廃石膏を地盤安定化資材として活用する際の、環境安全性について検討を行った。地盤安定化資材の製造業者による管理方法事例の調査を行い、そこから導き出される課題について評価基準や研究成果を整理した上で、安全性評価手法の検討を行った。

1.3 検討委員会の開催

石膏に係る基礎的知見、地盤安定化資材の実態や地盤安定化資材の環境安全性に係る情報を基に、施工後の環境安全性に係る課題とその評価方法等の検討を行うため、学識者、関連業界等からなる検討委員会の設置・運営を行った。

検討委員会に参加したメンバーを次に示す。

平成 21 年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務 検討委員会
委員長

横田 勇（静岡県立大学 名誉教授）

委員

小野 雄策（日本工業大学 ものづくり環境学科 教授）

勝見 武（京都大学 大学院地球環境学 教授）

清家 剛（東京大学 大学院新領域創成科学研究科 准教授）

西 美知男（社団法人 石膏ボード工業会 技術委員）

三本 守（全国産業廃棄物連合会 理事）

井上 雄三（独立行政法人国立環境研究所 特別客員研究員）

山下 俊介（社団法人 建築業協会 副産物部会委員）

環境省

坂川 勉（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 産業廃棄物課長）

高澤 哲也（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 産業廃棄物課長補佐）

相田 俊一（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 産業廃棄物課技術専門官）

酒井 輝久（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 企画課リサイクル推進室長
補佐）

佐藤 直己（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 産業廃棄物課基準係）

藤本 昭彦（環境省 大臣官房廃棄物・リサイクル対策部 企画課リサイクル推進室情
報普及係）

オブザーバー

福瀬 康裕（経済産業省 製造産業局 住宅産業窯業建材課 課長補佐）

東川 直正（国土交通省 総合政策局 事業総括調整官室 建設副産物企画官）

有野 充朗（国土交通省 総合政策局 建設業課 建設業技術企画官）

増田 仁（国土交通省 総合政策局 事業総括調整官室 調整官）

岩崎 等（国土交通省 総合政策局 建設業課 課長補佐）

遠藤 和人（独立行政法人国立環境研究所 資源化・処理処分技術研究室 主任研究員）

検討委員会の開催概要を表 1.3-1 に示す。

表 1 . 3 - 1 検討委員会開催概要

	名称	開催日時	開催場所
1	平成 2 1 年度廃石膏ボードの再資源化 促進方策検討業務 第 1 回検討委員会	平成 21 年 9 月 4 日 10:00 ~ 12:00	日本教育会館 7 0 3 号室
2	平成 2 1 年度廃石膏ボードの再資源化 促進方策検討業務 第 2 回検討委員会	平成 21 年 11 月 12 日 10:00 ~ 12:00	航空会館 7 0 3 会議室
3	平成 2 1 年度廃石膏ボードの再資源化 促進方策検討業務 第 3 回検討委員会	平成 22 年 1 月 21 日 10:00 ~ 12:00	法曹会館 2 階 高砂の間
4	平成 2 1 年度廃石膏ボードの再資源化 促進方策検討業務 第 4 回検討委員会	平成 22 年 3 月 9 日 14:00 ~ 16:00	東京八重洲ホール 3 0 2 会議室

第2章 石膏に係る基礎的知見の収集

2.1 石膏の物性

石膏は硫酸カルシウムの一般名として知られる物質で、古代からアラバスタ（雪花石膏）或いはセレナイト（透石膏）を用いた工芸品をはじめ、天然石材、積石の目地用の石膏モルタル或いは石膏プasterとして用いられたのに始まる。以来、二水石膏は焼き石膏製造原料として、ポルトランドセメント系セメントの凝結遅緩材用、農業用、更に無水石膏とともに顔料、フィラー、硫酸根資材として広く利用される。

半水石膏はいわゆる焼き石膏として、その水和硬化性を利用して建築材料として多量に用いられ、更に陶磁器工業、金属精密鑄造、歯科、外科医療、美術工芸などにおける型材などとして広く使用される。

2.1.1 天然石膏

自然界に産出する石膏のことで、天然には単結晶のほかに結晶集合体が生じ、透明のものを透明石膏（セレナイト、selenite）、繊維状のものを繊維石膏（satinspar）、細かい粒状のものを雪花石膏（アラバスター、alabaster）と呼ぶ。

現在では、日本における天然石膏の産出はみられないが、1960年代前半までは40もの石膏鉱山があり、1964年には75万トンもの出荷が見られた。（国内の天然石膏鉱業は、1976年初期に全鉱山が閉山）

一方、諸外国の天然石膏は、水成鉱床からなるものが多く、鉱床自体の規模が大きい。また、得られる石膏の品位も高く、安価に供給されるため、供給量はかなり多い。

2.1.2 石膏の結晶形ごとの物性

石膏の形態として、多形の名称を表 2.1-1 に、その生成条件及び物性を表 2.1-2 に示す。硫酸カルシウムの相としては、二水石膏、半水石膏、3種類の無水石膏があり、さらに相律上の相としてではないが、半水石膏と型無水石膏にそれぞれ、型の2種類があり、全体では7種類に分類することができる。このほかに、2/3水和物の存在とその結晶学的データの報告も見られるが、これは型無水石膏の吸湿水和過程において、また、二水石膏の空気中での加熱脱水過程において認められるものである。この形態は焼き石膏の工業的製造に際しての熟成の問題と関連することが考えられるが、物質としての固定相として現実的な意味はなく、化学的に準安定形としての存在だけが考えられているものである。石膏の結晶学的性質を表 2.1-3 に示す。

表 2.1-1 硫酸カルシウムの多形

名称	二水石膏	半水石膏	型無水石膏	二型無水石膏	型無水石膏
別称	石膏 (石膏全体を指すこともある。)	焼き石膏 型は硬質石膏ともよぶ。	型無水セッコウ 可溶性無水セッコウ	型無水石膏 (低温型無水石膏) 硬石膏 (天然無水石膏) 不溶性無水石膏 難溶性無水石膏	型無水石膏 (高温型無水石膏)
産出	天然石膏 化学石膏			硬石膏	

表 2.1-2 硫酸カルシウムの各形態の生成条件と物性

	二水石膏	半水石膏		型無水石膏		型無水石膏		型無水石膏
						難溶性	不溶性	
平衡生成温度(°C)		>97 水中	>45 大気中	>50真空中 100大気中 107大気中		型半水石膏から177 型半水石膏から300		>1180
工業的生成温度(°C)		105~150	125~160	110~220	180~220	>350	>400	
示性式	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	-CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	-CaSO ₄	-CaSO ₄	-CaSO ₄		-CaSO ₄
式量	172.17	145.15	145.15	136.14	136.14	136.14		136.14
結晶水(%)	理論値	6.21		0		0		0
	実験値	6.21~8.0	6.21~8.9	0.02~0.05	0.2~0.9	0		0
比重(g/cm ³)	2.315	2.757	2.619~2.637	2.587	2.484	2.93~2.98		
比熱(cal/mol)	21.84+0.076T	16.95+0.039T	1.148+0.061T	14.10+0.33T		14.10+0.33T		
水和熱(cal/mol)		4100±20	4600±20	6150±20	7210±10	4030±20		
溶解度	3	0.1810	0.825	1.006	1.15	0.377		
	50	0.2038	0.426	0.426	0.48	0.184		

表 2 . 1 - 3 石膏の結晶学的性質

	二水石膏	半水石膏		無水石膏			
				型	型	型	
結晶形	単斜晶	三方晶		六方晶	斜方晶	立方晶	
格子定数	$a=10.47$ $b=15.15$ $c=6.28$ $\alpha=98^\circ 58'$	$a=b=6.83$ $c=12.70$		$a=b=6.99$ $c=6.34$	$a=6.96$ $b=6.95$ $c=6.21$	$a=7.67$ $(a=7.8)$	
空間群	C_{2h}^6	D_{3d}		D_6^4	D_{2h}^{17}		
単位格子Z	8	12		6	4		
光学性	+	+		+	+		
光学方位性	n b	n c		n c	n c		
光学軸角	n /c=52° 58 ~ 60°	14°		ほとんど0°	42 ~ 44°		
屈折率	n	1.521	1.559	1.550	1.501	1.544	1.570
	n	1.523	1.559	1.550	1.501	1.544	1.576
	n	1.530	1.584	1.556	1.546	1.556	1.614

石膏の種類とその性質を以下に示す。

(1) 二水石膏

結晶形：単斜晶

化学式：CaSO₄ · 2H₂O

性質・特徴：加熱（160 °C ~ 170 °C）により水分を失い、半水石膏に変化する。

天然には、温泉作用や閉じ込められた海水からの岩塩の形成に付随して生じる。比重 2.23 の無色の結晶。硬度 1.5~2。水に難溶。単斜晶系に属する。

天然には単結晶のほかに結晶集合体が生じ、透明のものを透明石膏（セレナイト、selenite）、繊維状のものを繊維石膏（satinspar）、細かい粒状のものを雪花石膏（アラバスター、alabaster）と呼ぶ。セレナイトは窓用として、アラバスターは彫刻の素材として古来より用いられてきた。また、排気ガスの脱硫過程、燐酸系化学肥料の製造工程でも生じるため、これらは回収される。

(2) 半水石膏

結晶形：三方晶

化学式：CaSO₄ · 1/2H₂O

性質・特徴：土壌中及び溶岩内から発見されている。

半水石膏は、水と化学反応し二水石膏に変化する。骨折時の治療用具としてのギプス、型取り用の石膏は、粉末状の半水石膏を水と反応させ、二水石膏（単に「石膏」ともいう）として硬化させたものである。

型半水石膏：加圧水蒸気加熱または加圧水溶液加熱法（工業的生成温度：105～150℃）により製造される半水石膏。水蒸気又は水の中で転移して結晶の形が整って緻密である。

型半水石膏：大気中加熱法（工業的生成温度：125～160℃）により製造される半水石膏。殆ど二水石膏の形のままで水が抜けたポーラスな状態である。

（3）無水石膏

型無水石膏

結晶形：六方晶

化学式： CaSO_4

性質・特徴：水を吸収して半水石膏に戻りやすく、大気中の湿気によって容易に、瞬間的に半水石膏になる。

型無水石膏

結晶形：斜方晶

化学式： CaSO_4

性質・特徴：強度、硬度が高く化学的に不活性であり、溶解度も低い。水和しにくく、天然にも硬石膏として産出する。

型無水石膏

結晶形：立方晶

化学式： CaSO_4

性質・特徴：型無水石膏がCaOとSO₃とに分離する過程の準安定相であり、型無水石膏の擬正方格子が膨張した充填性の低い立法格子である。

2.1.3 石膏の強度

石膏硬化体の強度に影響する因子のうち最大のものは含有水分である。その他、混練温度、混練時間、混練強さ、添加物などがある。まず、石膏硬化体の強度は、含有する自由水の量によって著しく影響されるので、セメント系の硬化体の場合とかなり相違する。すなわち、わずか1~2%の自由水の含有によって強度は急激に低下して乾燥強度の40%程度となる。それ以上は水分が増加してもほとんど変わらない。これにより硬化体を形成している二水石膏のからみ合った結晶が、わずかの水分の存在によって湿潤し、結晶間の摩擦抵抗や結晶吸引作用が弱められると考えられる。各種石膏の物理化学的性質例を表2.1-4に示す。

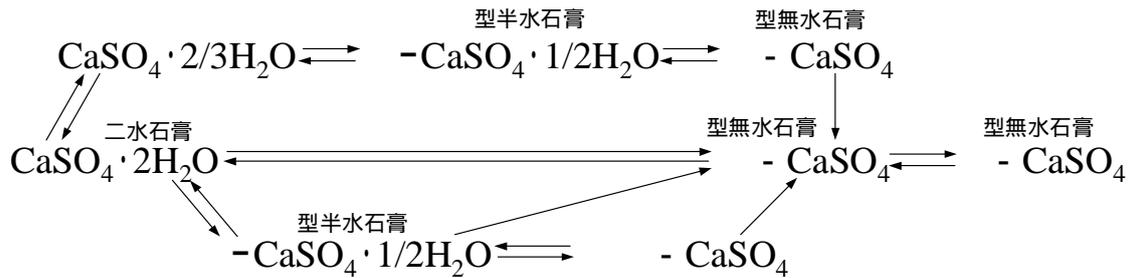
表2.1-4 石膏の物理化学的性質

項 目	-半水 石膏	-半水 石膏	-無水 石膏 ^{*1}
比表面積 (cm ² /g)	3490	5790	7840
比 重	2.74	2.59	2.93
標準混水量 (%)	36.7	84.7	35
フロー値 (mm)	226	276	170
擬 結 ^{*1}			
h-min	始 発	0-8	0-22
	終 結	0-18	0-35
曲げ強さ	2hまたは1d	77.2(2h)	30.4(2h)
(kg/cm ²)	7d	147.7	45.0
圧縮強さ	2hまたは1d	175(2h)	37(2h)
(kg/cm ²)	7d	398	73
			381

*1 -無水セッコウには硬化促進剤1.5%添加

2.1.4 石膏の熱的性質

石膏（硫酸カルシウム）の多形は、二水石膏の加熱脱水（大気中あるいは水中）と加熱転移および再水和によって生成させることができる。それらの平衡関係は、天然石膏鉱床の成因の解明、あるいは石膏製品の製造法や水和凝結硬化性に直接関連する重要な問題である。硫酸カルシウム各形態の平衡を示す相関関係及びその平衡条件を図 2.1-1 に、また、石膏の DTA 曲線を図 2.1-2 に示す。



気相 > 50 , DTAピーク温度約140 ~ 160	液相 > 97
気相吸湿, 液相水和	液相水和
気相 > 76 , DTAピーク温度約150 ~ 185	気相 > 130 , DTAピーク温度約180 ~ 215
気相吸湿	気相吸湿, 液相水和
液相水和	液相 > 97
気相 > 130 , DTAピーク温度約180 ~ 215	気相 > 180 , DTAピーク温度約190 ~ 220
気相吸湿, 液相水和	液相 > 41
気相 > 250 , DTAピーク温度約330	液相水和
気相1180	

図 2.1-1 硫酸カルシウム各相関の転移関係

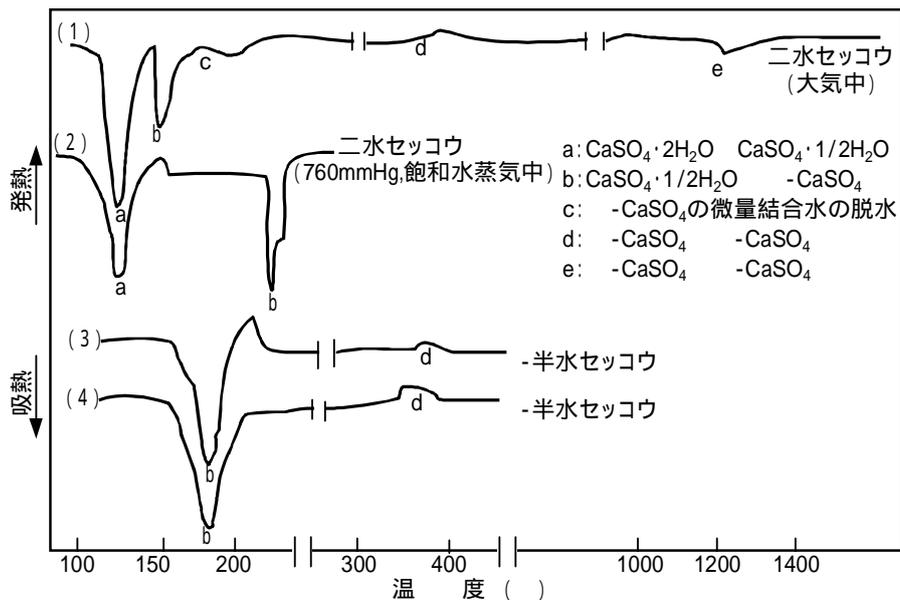


図 2.1-2 石膏の DTA 曲線

2.2 化学石膏の組成

2.2.1 化学石膏の種類

化学石膏は、リン酸石膏、チタン石膏、フッ酸石膏、排煙脱硫石膏、硬水・精練石膏、その他に類別されているように、リン酸、チタン、フッ酸などの主に製品を取り出した後の副産石膏として産出するものや排煙規制によって排煙中のSO₂を捕集する排煙脱硫から産出するもの、鉱水・精練の酸の中和石膏として産出するものなど多岐にわたり、排煙にあっても、石炭・重油火力発電、精練、石油化学、石油精練、紙パルプ、鉄鋼、化学繊維など産出する業種は様々である。

化学石膏は微粉であるため、焼成前の粉碎は必要としないが、生産する業種により石膏の粒子に遊離酸分、水溶性塩類、有機物等、石膏の凝結を妨げる物質が付着している場合が多いので、フローテーション、洗浄などを行い有害物質を取り除く必要がある。また、付着水分を多く含むため水分の調整、均一化を図るためにロータリードライヤー、ハゼマックドライヤーなどの乾燥機で乾燥する場合がある。

表 2.2-1 に種類ごとの石膏原料の消費量・構成比を示す。

表 2.2 - 1 石膏原料の消費量・構成比

単位:トン(CaSO₄・2H₂O 100%換算)

年度	国産							輸入				廃せこうボード				合計	
	リン酸石膏	排煙脱硫石膏	チタン石膏	フッ酸石膏	鉱水・精練石膏	その他	小計	天然石膏	リン酸石膏	その他	小計	工場加工	新築現場回収	解体現場回収	その他		小計
平成18年	514,396	1,703,508	266,468	0	255,503	439,536	3,179,411	1,784,074	860	0	1,784,934	116,075	260,766	22,352	2,155	285,273	5,249,618
19年	493,610	1,581,044	270,885	0	232,074	457,314	3,034,927	1,537,306	900	0	1,538,206	107,590	267,341	20,509	3,565	291,415	4,864,548
20年	459,160	1,570,480	266,400	0	251,570	476,900	3,024,510	1,386,902	900	0	1,387,802	100,335	246,106	20,170	4,800	271,076	4,683,388
上	227,890	769,940	126,160	0	125,960	220,300	1,470,250	695,865	450	0	696,315	49,049	121,382	10,085	2,400	133,867	2,300,432
下	231,270	800,540	140,240	0	125,610	256,600	1,554,260	691,037	450	0	691,487	51,286	124,724	10,085	2,400	137,209	2,382,956
21年	463,810	1,545,300	273,100	0	251,700	445,400	2,979,310	1,434,680	900	0	1,435,580	102,769	247,231	20,220	4,800	272,251	4,687,141
平成18年	9.80%	32.45%	5.08%	0.00%	4.87%	8.37%	60.56%	33.98%	0.02%	0.00%	34.00%		4.97%	0.43%	0.04%	5.43%	100.0%
19年	10.15%	32.50%	5.57%	0.00%	4.77%	9.40%	62.39%	31.60%	0.02%	0.00%	31.62%		5.50%	0.42%	0.07%	5.99%	100.0%
20年	9.80%	33.53%	5.69%	0.00%	5.37%	10.18%	64.58%	29.61%	0.02%	0.00%	29.63%		5.25%	0.43%	0.10%	5.79%	100.0%
上	9.91%	33.47%	5.48%	0.00%	5.48%	9.58%	63.91%	30.25%	0.02%	0.00%	30.27%		5.28%	0.44%	0.10%	5.82%	100.0%
下	9.71%	33.59%	5.89%	0.00%	5.27%	10.77%	65.22%	29.00%	0.02%	0.00%	29.02%		5.23%	0.42%	0.10%	5.76%	100.0%
21年	9.90%	32.97%	5.83%	0.00%	5.37%	9.50%	63.56%	30.61%	0.02%	0.00%	30.63%		5.27%	0.43%	0.10%	5.81%	100.0%

20年度は19年度までの実績値から予測

出典: 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課資料

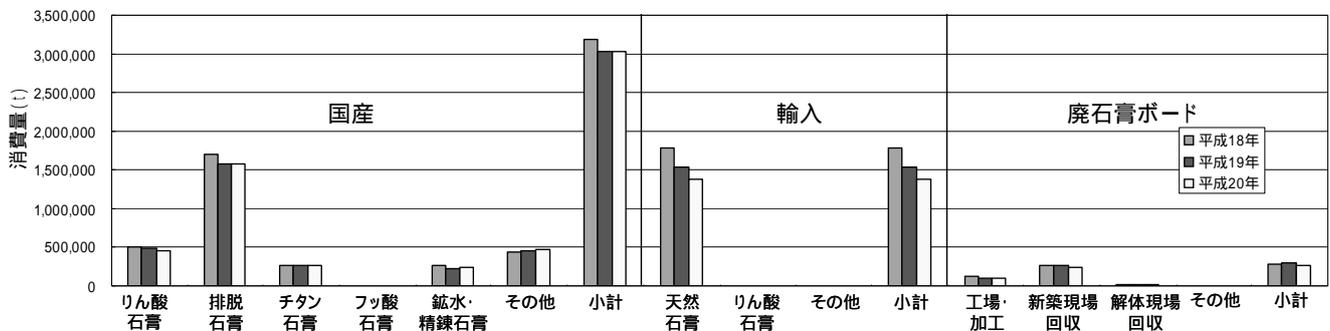


図 2.2 - 1 石膏原料の消費量

2.2.2 化学石膏の生産量

(1) 化学石膏の用途別消費量

国内で生産される化学石膏の生産量「5,702 千 t」(化学工業統計)の排出先とその使用用途、及び各化学石膏の生産量の推計を行った。

国内で生産される石膏はそのほとんどが、石膏ボードメーカーの製造工場とセメントメーカーの製造工場に搬出され、その割合は概ね 6 : 4 程度である。また、その他医療や機械、工芸品などに使用されている。

1) 石膏ボードメーカーの化学石膏消費量

石膏ボードメーカーで消費された石膏は、2007 年度において 3,035 千 t (経済産業省製造産業局)である。

2) セメントメーカーでの化学石膏消費量

セメントメーカーで消費された石膏は、2007 年度において 2,636 千 t (セメント協会)である。

3) その他用途での化学石膏消費量

石膏ボード、セメント以外での化学石膏消費量は、(化学石膏生産量) - (石膏ボードメーカーでの消費量) - (セメントメーカーでの消費量)から、概ね 31 千 t 程度であると推測される。

(2) 化学石膏の種類別生産量

各種化学石膏の生産量を、各種統計資料及び生成プロセスにおける副産割合から推計を行った。推計結果を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 化学石膏の種類別生産量

種類	生産量 (H19 年度：推計含む)	出典・算出方法
排煙脱硫石膏	1,970 千 t	リサイクルデータブック、(財)クリーン・ジャパン・センター
リン酸石膏	725 千 t	リン酸生産量：145 千 t (生産・出荷・在庫統計) リン酸とリン酸石膏の発生割合 = 1 : 5 (ヒアリング)
チタン石膏	984 千 t	酸化チタン生産量：246 千 t (生産・出荷・在庫統計) 酸化チタンとチタン石膏の発生割合 = 1 : 4 (ヒアリング)
フッ酸石膏	0 千 t	フッ酸石膏を生成しないフッ酸の製造方法が主流
鉍水・精錬石膏及びその他	2,023 千 t	全体生産量 - (排煙脱硫石膏 + リン酸石膏 + チタン石膏)
計	5,702 千 t	種類別化学石膏の合計値

2.2.3 化学石膏の生成過程

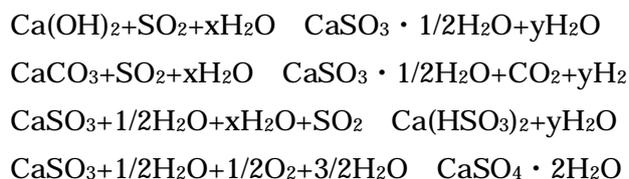
(1) 排煙脱硫石膏

1) 排煙脱硫石膏の生成メカニズム

① 石灰・石膏法による脱硫プロセス

日本の排煙脱硫はほとんど湿式法で、その大部分はセッコウ、すなわち排脱セッコウを副生する方法である。なかでも本流は石灰・セッコウ法で、石灰または石灰石微粉のスラリーに排ガスを通じ、SO₂を吸収していったん亜硫酸カルシウム半水和物 CaSO₃・1/2H₂O とし、これを空気で酸化して CaSO₄・2H₂O、すなわちセッコウとするプロセスである。石灰・石膏法の最も一般的な工程図を図 2.2-2 に示す。

電気集じん機を出た排ガス (SO₂ 500 ~ 2000ppm, ダスト 20 ~ 50mg/Nm³, 温度 120 ~ 150) は、冷却塔で水洗いされて 60 ~ 70 となり、次にスクラバー (吸収塔) に入る。吸収塔にはさまざまな型が用いられ、排煙脱硫装置の最も重要な部分である。吸収塔内では、石灰 (石灰石) のスラリーと SO₂ とが接触して次の式のような反応が起こる。



吸収塔を出たスラリーは上の各反応による生成物の混合物で、pH は 4 ~ 5 程度で、これにいくらかのダストなど、不純物が加わる。次にこのスラリーを酸化して石膏とする。酸化は pH が低い方がすみやかであるので、酸化塔に入るスラリーの pH は 4 程度にたもたれる。酸化塔では気泡によって亜硫酸カルシウムを酸化して石膏とする。

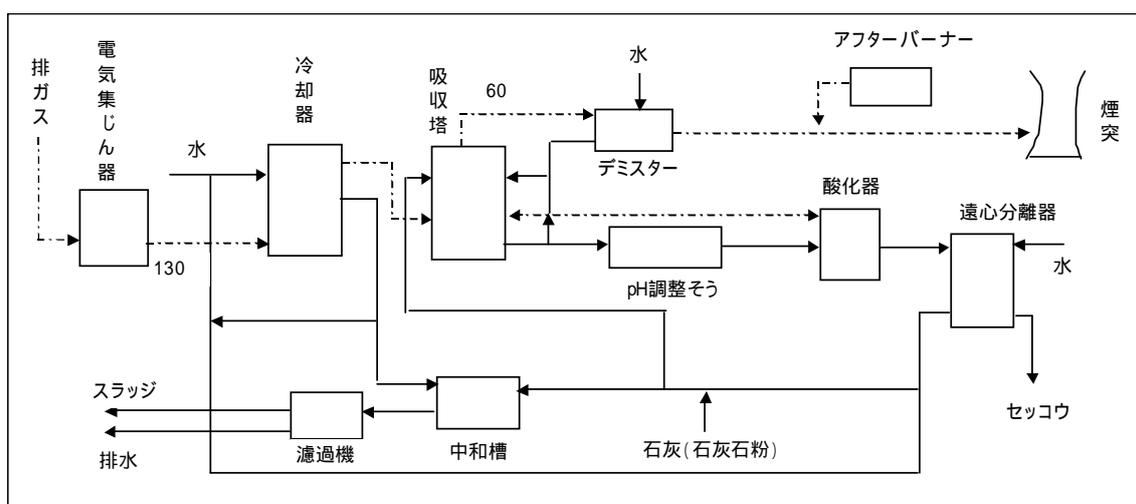
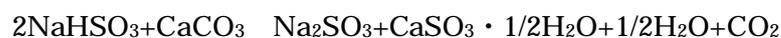


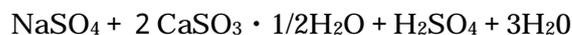
図 2.2-2 石灰・石膏法の代表的工程

) 間接石灰・石膏法による脱硫

石灰・石膏法は石灰や石灰石の粉末を含むスラリーに直接 SO₂ を吸収するプロセスで原理的に最も優れているが、装置の設計や運転をうまく行わないとスケーリングを起こしやすい。このスケーリングを防止するため、吸収をソーダ溶液またはアンモニア溶液で行ったのち、反応液に石灰を加えてセッコウを沈殿させる方法が、間接石灰・セッコウ法と呼ばれ、多くの工場において操業している。例えば、亜硫酸ナトリウム溶液で SO₂ を吸収する場合、次式のような反応によって CaSO₃・1/2H₂O が得られ、酸化されることによって石膏となる。



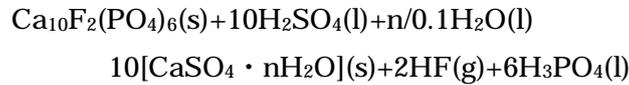
酸化の過程において Na₂SO₃ の一部は Na₂SO₄ となり、SO₂ の吸収能が減るので、次の式により石膏として取り除き、生成した NaHSO₃ は反応槽にもどす。



間接石灰石膏法は直接石灰石膏法と比べると、石膏の形状制御が容易で、しかもかなり大きな結晶が得られ、遠心分離後の石膏の水分も 6～12% で低い。

(2) リン酸石膏

リン鉱石 $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$ を分解し、生成物として液相にリン酸 H_3PO_4 、固相に石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ を得る工程で、その反応は次の式によって表される。



ここに(s)は固相、(l)は液相、(g)は気相を示す。セッコウの結晶水 n は反応条件により 2, 1/2, 0 となる。

1) 生成メカニズム

) 湿式リン酸製造法

日本においては副生するリン酸石膏の利用価値を高める立場から、ほとんどすべてが半水・二水石膏法を採用しており二水石膏法の占める割合は 1/8 程度に過ぎない。

この方式の特徴としては、リン鉱石の硫酸分解を分解と水和の 2 工程に分離して反応温度や濃度を調節することにより、まず、セッコウを半水セッコウの結晶として生成させ、次にこれを水和させて二水セッコウの大きな結晶に成長させることである。すなわち、二水セッコウの安定域よりも高い温度 (80 ~ 100) でリン鉱石を分解して、いったん半水セッコウの結晶をつくり、次に温度を 70 まで下げることで半水セッコウを溶解して溶解度の低い二水セッコウに再結晶させるのである。

半水・二水セッコウ法製造工程を図 2.2-3 に示す。

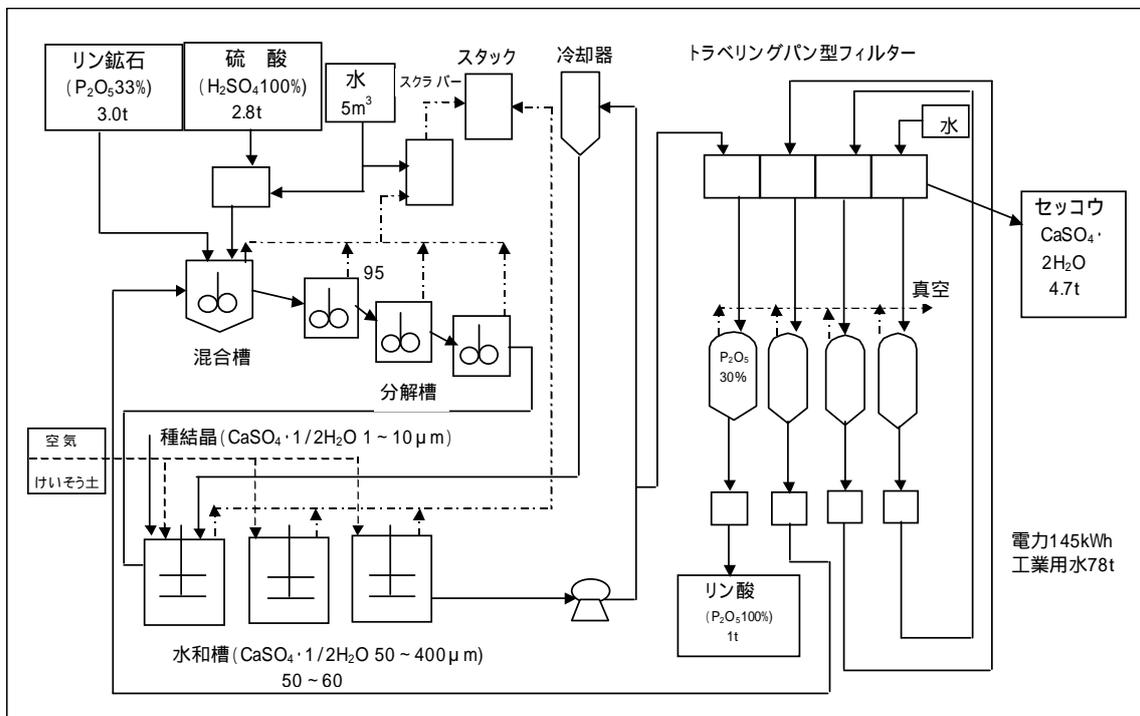
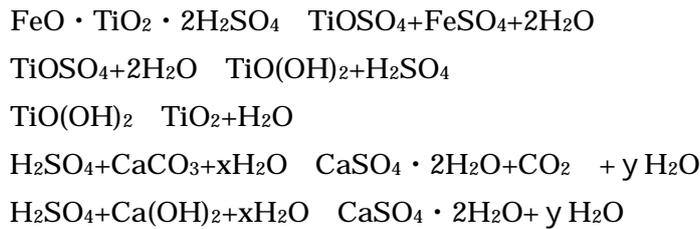


図 2 . 2 - 3 半水・二水セッコウ法製造工程

(3) チタン石膏

チタン石膏は酸化チタンの製造の際に副産するセッコウである。1994年の年間生産量は約57万tであった。酸化チタン(TiO₂)の製造はチタン鉱石(FeO・TiO₂)に濃硫酸を作用させ、得られる硫酸チタニル溶液の加水分解によって酸化チタン(TiO₂・nH₂O)を沈殿物として得る。この際の濾液は硫酸を多量に含むので、これにCaCO₃またはCa(OH)₂を加えてセッコウを沈殿、分離する。反応式は次のように示される。



製造工程のフローシートを図2.2-4に示す。チタンを除いた廃液中には多量の硫酸と硫酸鉄を含み、多種類の不純物を含むので、チタンセッコウは一般に黄かっ色に着色している場合が多い。廃酸の化学成分(g/l)の例を示すと、全硫酸：200～500、遊離硫酸：100～400、Fe：20～50、Al：0.5～10、Ti：0.5～10、Mg：0.5～10、Mn：0.5～10、V：0.1～2、Cr：0.1～2である。

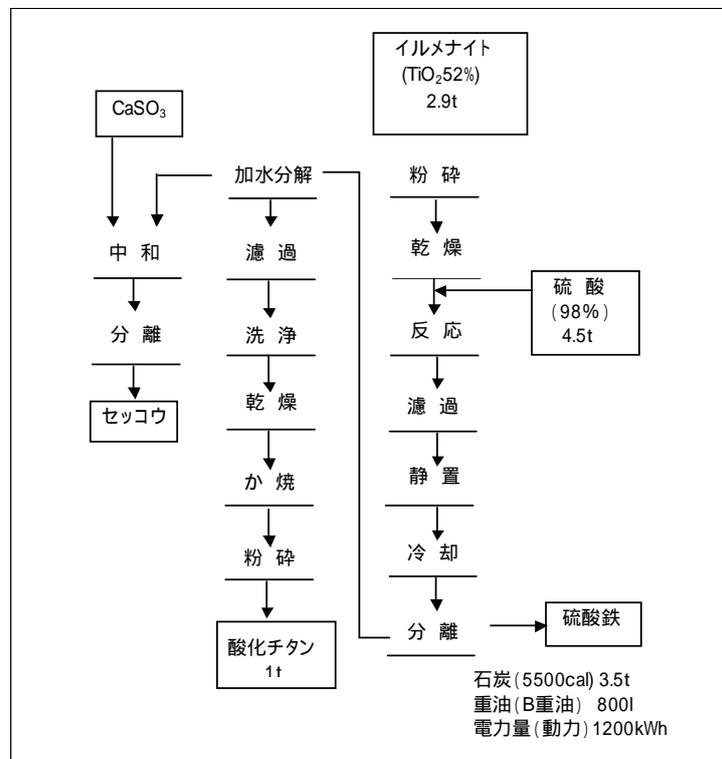


図2.2-4 硫酸法による酸化チタンの製造系統

2.2.4 化学石膏の品質

化学石膏は、リン酸、チタン、フッ酸などの主に製品を取り出した後の副産石膏として産出するものや、排煙規制によって排煙中の SO₂ を捕集する排煙脱硫から産出するものなど多岐に渡るため、副産の過程において不純物を含む。不純物は強度の低下を招くなど品質に影響する。表 2.2-3 に各種化学石膏の品質（含有不純物等）を示す。

表 2.2-3 化学石膏の品質

種類	品質（不純物等）
排煙脱硫石膏	吸収塔を出たスラリーにいくらかのダストなど、不純物が加わるが、セメント及び石膏ボードの品質に悪影響を与えるような有害成分は含まない。
リン酸石膏	主な不純物：酸化りん（P ₂ O ₅ ）、フッ素（F）、二酸化ケイ素（SiO ₂ ） 固溶 P ₂ O ₅ はセメントや焼き石膏として使用する場合、水和が始まるとすぐ溶出して凝結を遅らせ、強度に大きな影響を与える。
チタン石膏	チタンを取り除いた廃液中には多量の硫酸と硫酸鉄を含み、多種類の不純物（Fe、Ti）を含む。
フッ酸石膏	使用用途としては膨張セメントの原料になる程度である。
鉍水・精錬石膏	スラリーにいくらかのダストなど、不純物が加わるが、セメント及び石膏ボードの品質に悪影響を与えるような有害成分は含まない。

出典：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック、及び製造工場ヒアリング

2.2.5 化学石膏の製造工場

化学石膏を副産物として産出する業種は多岐に渡り、製造工場は全国に点在している。以下に化学石膏種類ごとの業種・工場の例を示す。

排煙脱硫石膏 : 石炭・重油火力発電、精錬、石油化学、石油精錬、紙パルプ、鉄鋼、
化学繊維

リン酸石膏 : リン酸製造工場

チタン石膏 : 酸化チタン製造工場

フッ酸石膏 : フッ酸製造工場（現在は製造工法の変化により製造は行っていない）

鉍水・精錬石膏 : 金属精錬工場

2.3 廃石膏ボードの紙・石膏分離技術（破砕設備）の詳細

2.3.1 石膏ボードメーカーの分離技術

石膏ボードメーカーでは、新材の製造過程において排出される端材や新築現場で発生した余剰材などを回収し、原料石膏に配合することで再利用を行っている。石膏ボード工業会へのヒアリング結果によると、平成14年度から、製造時に発生する端材全量の再利用を達成している。

端材・余剰材のリサイクル工程を以下に示す。図2.3-1に石膏ボード製造工程における廃石膏の配合工程を示す。

粗粉砕機にかけて10cm角程度の大きさに粉砕

微粉砕機にかけて10mm以下に粉砕

天然石膏及び排煙脱硫石膏等の原料石膏に配合し、焼成
(この際、ボード用原紙も繊維状に分解され、焼き石膏に混入される)

特徴：紙と石膏に意図的に分離せずに原料石膏として配合する。焼成後の焼き石膏の粉砕装置を経ると1mm以下となり、ボード用原紙の部分は繊維状に分解される。

課題：1) 廃材の微粉砕品のかさ比重が軽く、輸送や貯蔵の整備増強が必要
2) 混水量が増し、生産性が低下

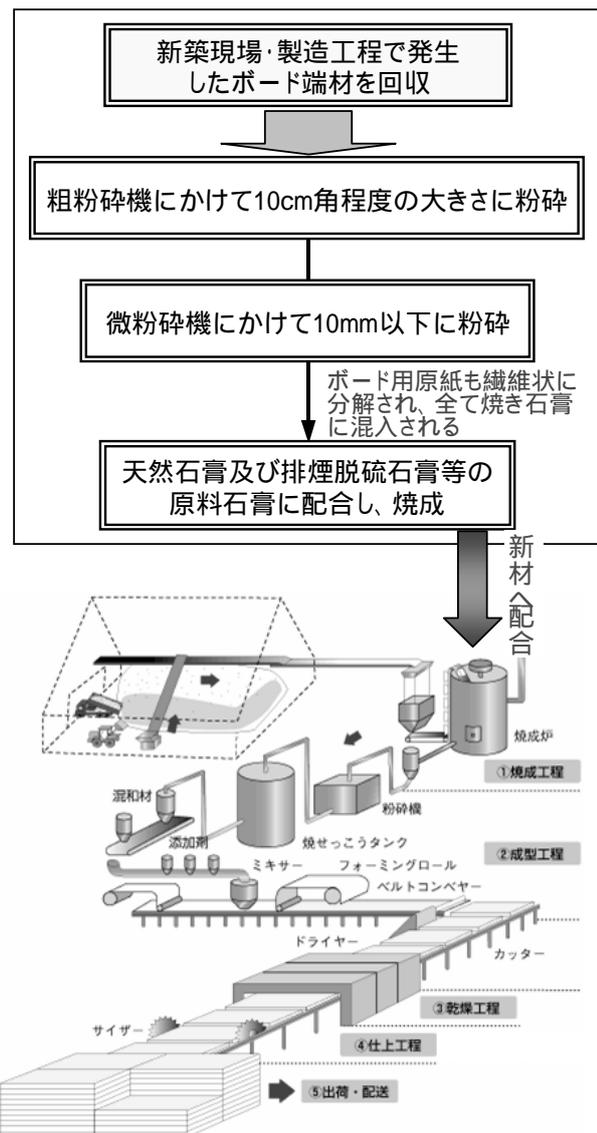


図2.3-1 廃材の石膏ボードへのリサイクルフロー

2.3.2 廃石膏処理施設が保有する分離技術事例

廃石膏処理施設が保有する分離技術として、石膏ボードを粉砕した後に紙と石膏を分離する技術と、石膏ボードの紙を粉砕せずに石膏と分離する技術の2つの事例について整理を行った。

[事例1] 石膏ボードを粉砕した後に紙と石膏を分離する技術

(1) 石膏ボード粉砕装置の概要

項目	概要
処理能力	0.6t/h (最大)
電動機合計	10Kw (AC200V)
石膏ボード投入方法	手動投入
受け方法	フレコン

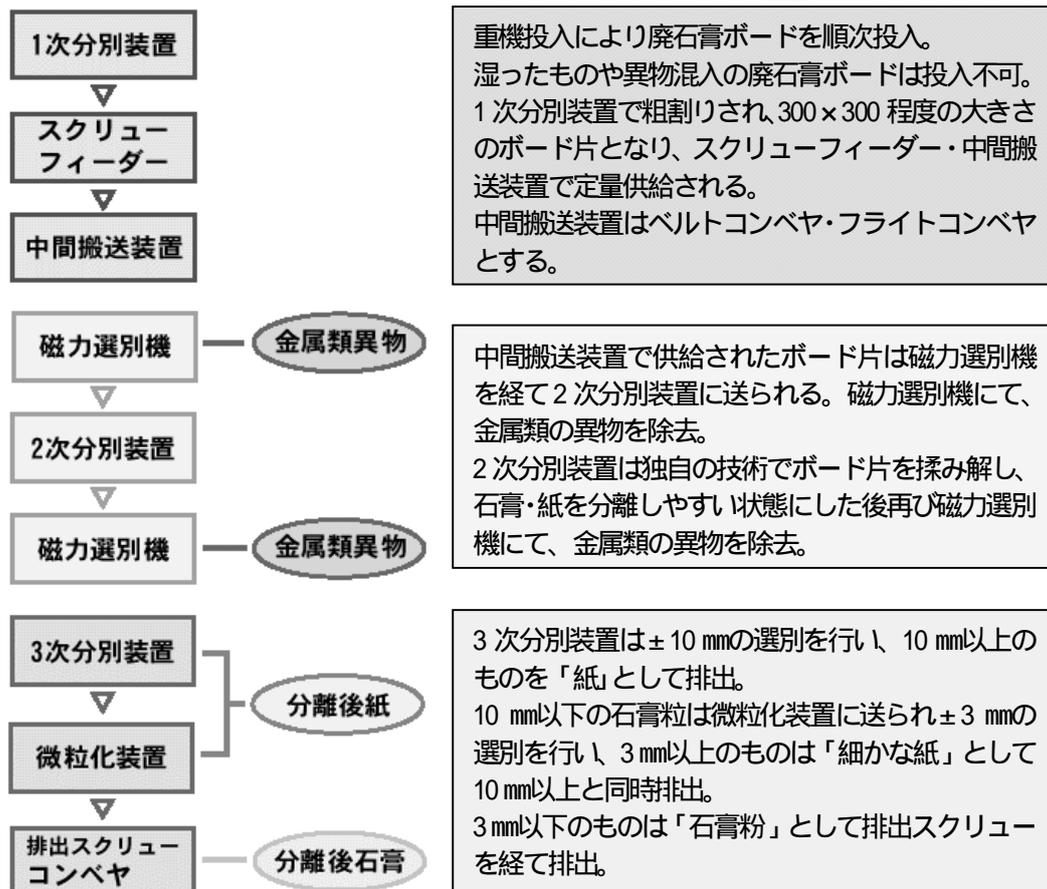
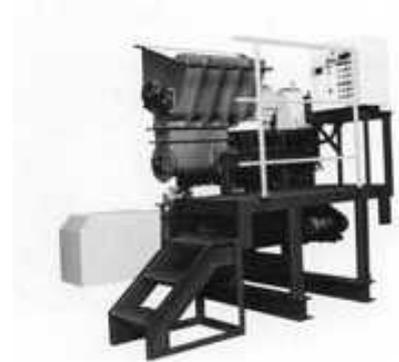


図2.3-2 分離フロー

(2) 紙と石膏の分離フロー

廃石膏ボードの投入から、紙と石膏が分離されるまでのフローを次に示す。

廃石膏ボードの投入。(投入は重機投入)

投入する廃石膏ボードは「乾燥状態」とします。湿ったものや金属等の異物が混入されているボードは一切投入不可。

1次分別装置では廃石膏ボードを200~300mm程度に粗割りし、中間搬送装置(チェーンコンベヤ or ベルトコンベヤ)を経て2次分別装置に送られる。

2次分別装置では独自の技術による回転羽根とケース本体で固定化された羽根の相互作用により、廃石膏ボードが『揉み解される』ように処理される。

磁力選別機は磁性物を除去するが、磁界に限りがあり、前選別段階での磁性物除去が必要となる。

3次分別装置では揉み解されたボード片の±10mm選別を行い、10mmオーバーは「紙」として排出し、10mmアンダーは排出スクリーコンベヤを経て微粒化装置に送られます。

微粒化装置では10mmアンダーの±3mm選別を行い、3mmアンダーは「石膏」として排出スクリーコンベヤを経て排出、3~10mmは専用出口より排出されます。

装置より発生する粉塵は局所集塵を行い、集塵装置で吸引する。

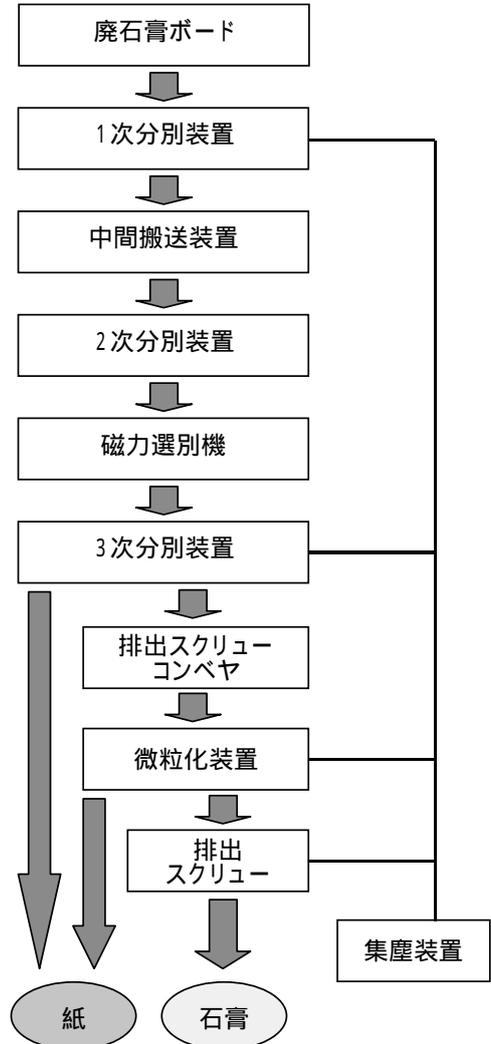


図2.3-3 システムの分離フロー

(3) 分別装置の特徴

分別装置の特徴を次に示す。

廃石膏ボードを構成する、石膏・紙をほぼ理想的な状態で分離することが可能
分離後石膏の紙含有率は2%以下、分離後紙に含まれる石膏は重量換算で25%程度
分離後の石膏の粒状が安定しており、紙は弱い火力でも燃焼する程度に石膏の除去が可能

(4) 分別装置以外の付帯設備

分別装置以外の設備としては、次のようなものがある。

-) 廃石膏ボード手選別ライン
 - ・ 解体系ボードの前選別機能として有効
-) 貯留設備
 - ・ 分離後石膏の貯留
-) 粒度調整ライン (1 mm/0.5 mm石膏生産設備)
 - ・ 石膏の付加価値向上に有効
-) 紙リサイクル装置 (乾式洗浄装置)
 - ・ 紙に付着する石膏の除去に有効
-) 廃石膏ボード乾燥装置
 - ・ バッチ排出 / 連続排出



上：分離装置

右：粒度調整装置



(5) 湿材対策

廃石膏ボードリサイクル設備は、石膏ボードを構成する石膏・紙を分離する装置であり、設備は乾式仕様のため、湿った石膏ボードの処理は基本的には出来ない。なお、水分を帯びたものを投入した場合、下記のような症状が発生する恐れがある。

分別装置の処理能力が著しく低下

動力負荷が増大、消費電力量が増加、装置保護のためのサーマルリレーが作動し、設備全体が緊急停止

分別装置内のスクリーン等で目詰まりが発生し、分離効率が変化

[事例 2] 石膏ボードの紙を粉砕せずに石膏と分離する技術

(1) 分離装置の特徴

両面の紙を粉砕することなく、石膏から剥離させることが可能。石膏の破碎と紙の剥離を 1 台で同時に行うことができる装置。

(2) 石膏ボード適応サイズ

分離装置が適応できる石膏ボードのサイズは次のとおりである。

ボード幅：480mmW 以下

ボード厚：9.5～12.5mmT

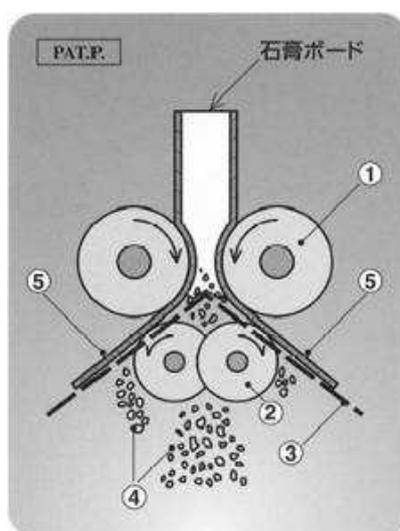
(3) 処理量

常用 400 ～ 500kg / 時 (最大：600kg / 時)

供給する原料サイズと投入作業により変動。

(4) 分離原理

水平配置の破碎ロール間にくい込ませた石膏ボードは、圧縮力と剪断力の作用を受け、両面の紙に挟まれた石膏は顆粒状あるいは粉末状に破碎されて落下する。又、破碎ロールを等速回転させる事により両面の紙は、破碎されずに排出される。更に紙面に残留する石膏は、破碎機能を持つ補助ロールによって掻き取られる。これら一連の作用によって、紙の分離と石膏の破碎を同時に行うことが可能となる。



破碎ロール
補助ロール
分離スクリーン
破碎された石膏
分離された紙

概念図

2.3.3 廃石膏ボード処理施設視察報告

(1) 廃石膏ボード処理施設

新築の建築工事や解体工事現場から排出された廃石膏ボードが、処理施設においてどのように分別・分離されているのかを調査するために、実際に廃石膏ボードを受け入れている処理施設の視察を行った。

視察を行った廃石膏ボード処理施設で行っている処理事業の内容を次に示す。

1) 廃石膏ボードの回収・受入

建設現場や解体現場などから排出された廃石膏ボードを回収し、受け入れる。受け入れ時にはトラックスケールにて重量を計算している。

2) 選別

選別ラインにて金属くずや木くずなどを石膏ボードから分離させる。(粉じんの飛散防止対策を施し、工場内外の環境に配慮)

3) 破碎・磁気選別・ふるい分け

破碎装置・磁気を使用した選別装置により石膏と紙を分離する。また、ふるい分けにより粒度の揃った高品質な石膏を製造する。

4) 再生製品の販売

再生石膏粉

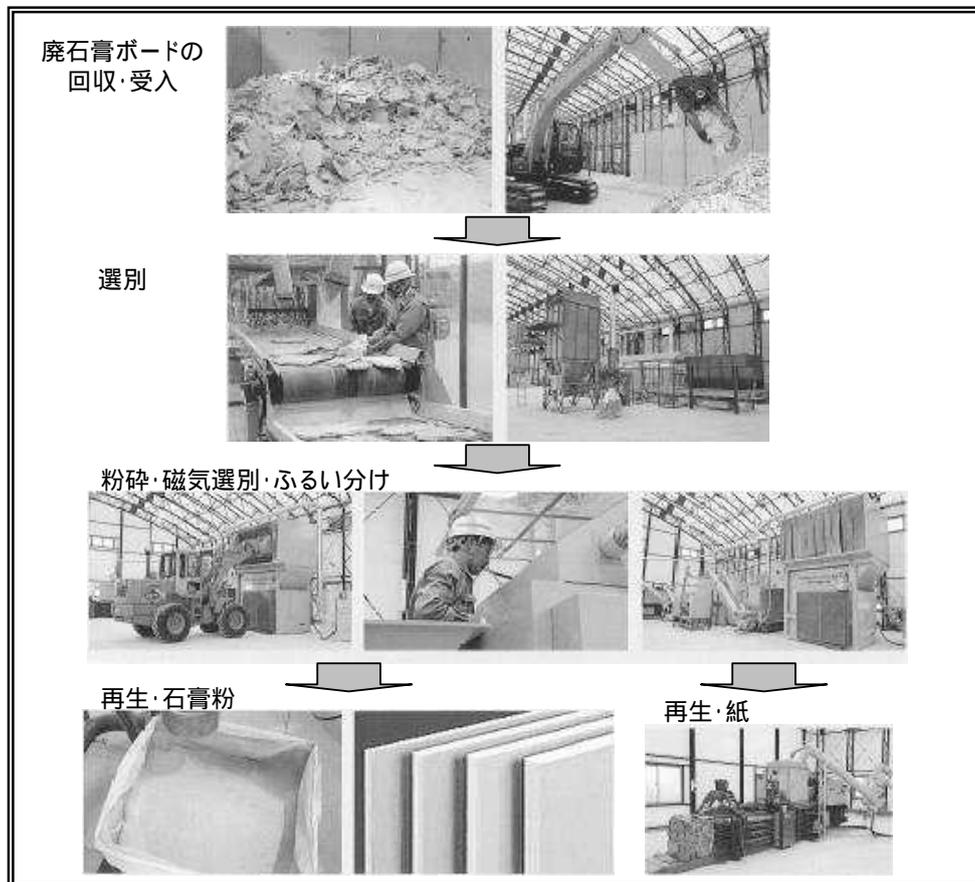
ボードメーカーにて再度、石膏ボード原料として利用される。

再生紙

製紙メーカーにて再生紙の原材料として利用される。

廃石膏ボード処理のフローと保有している設備を次に示す。

図 2 . 3 - 4 廃石膏ボード処理のワークフロー



施設内の様子



廃石膏ボード分離設備

(2) 汚染土壌・産業廃棄物処理施設

廃石膏ボードを処理して製品化された廃石膏粉を使用して、汚染土壌等の処理を行っているリサイクル施設の視察を行った。

視察を行った汚染土壌・産業廃棄物処理施設では、汚染土壌や汚泥等をセメント会社へ搬出するために、廃石膏を改質材として利用している。このような改質を行うことによって、分級やセメントでの処理を行いやすくすることが可能である。

廃石膏を使用する場合のフロー及び改質作業における石膏粉使用状況を次に示す。

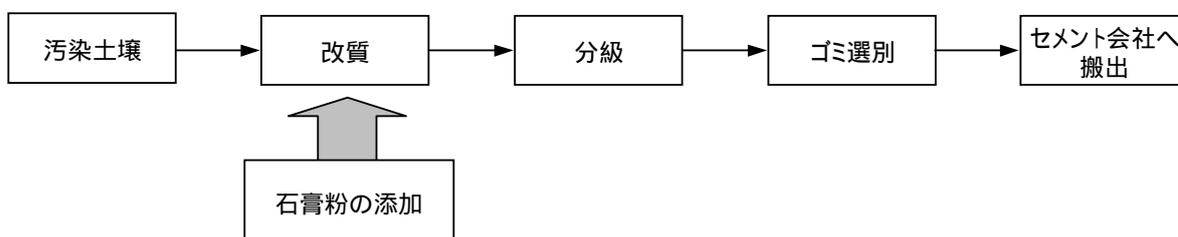


図2.3-5 汚染土壌への石膏粉適用フロー



改質作業における石膏粉使用状況

2.4 石膏粉処理設備（加熱処理設備）の詳細

石膏の焼成方法には 100～250 の低温焼成と 400 以上の高温焼成があり、前者には乾式と湿式焼成がある。一般に乾式低温焼成法では Ⅱ型半水石膏、湿式低温焼成法では Ⅰ型半水石膏、高温焼成法では無水石膏が得られ、焼き石膏の要求品質に応じて焼成法を選択する。

2.4.1 Ⅱ型半水石膏の焼成設備

焼成がまとしてはケトル（Kettle）と呼ばれる平がまが一般的に用いられている。ケトルが用いられるのは以下の特徴による。

- ・均一な加熱と脱水をゆっくりと行える
- ・回分焼成であるため化学的成分の調整が容易
- ・操業が容易で起動、停止が簡単
- ・生成焼き石膏の用途が広い
- ・設備費が安い
- ・熱効率が良い

ケトルの構造例を図 2.4-1 に示す。鋼板製円筒形の胴（肉厚 12～16mm）に欠球形底板（肉厚 28～38mm）をつけ、胴の中央部には伝熱煙道を 4 本貫通させている。

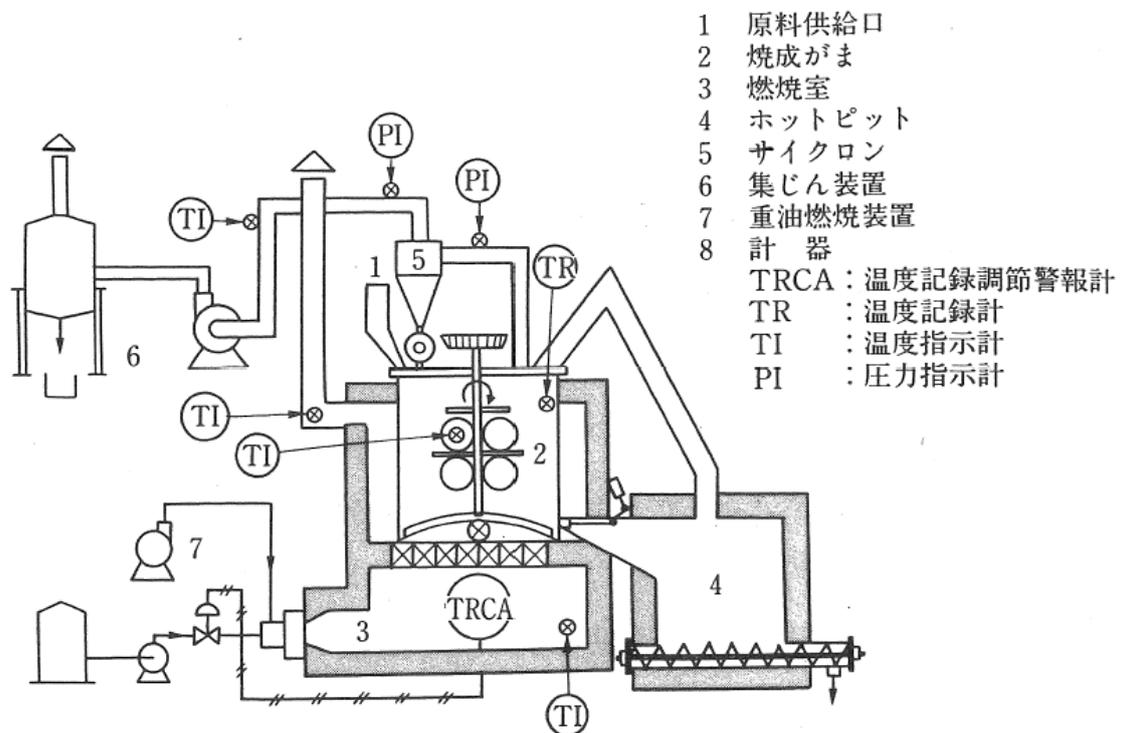


図 2.4-1 石膏焼成設備（ケトル）

2.4.2 型半水石膏の焼成設備

(1) 加圧水蒸気法

塊状、湿潤状粉末、ブリケット状の石膏を加圧がま(オートクレーブ)の中で 125 ~ 150 の飽和水蒸気圧下に 3 時間以上保持し製造する方法。

低温度でゆっくり晶出、転移させたものほど低混水量で高強度のものが得られる。ブリケット化した原料を用いた加圧設備は、搬送を考慮した台車が用いられている。焼成された型半水石膏をそのまま加圧がまの中で乾燥するか、別の乾燥機に移すかは生産性に大きく関与する。かまの形態は静置式と回転式があり、いずれも円筒式の耐圧容器で圧力容器としての検査に合格したものが用いられる。

(2) 加圧水溶液法

石膏原石粉末、化学石膏などの粉末原料を用い、媒晶剤水溶液中に懸濁し、120 以上の加圧下で型半水石膏を製造する方法。図 2.4-2 に連続生産プロセスを示す。

本プロセスは複数の加圧反応槽、遠心分離機を設置しているのが特徴である。つづく乾燥設備も高性能のものが利用されるが、一般的に気流乾燥方式は無水石膏化が問題となる。生産性を高め、しかも化を完全に行うために多くの工夫がなされている。焼成温度は低いほど低混水量の半水石膏が得られ、媒晶剤の種類にもよるが 30 分以上で反応が終了する。

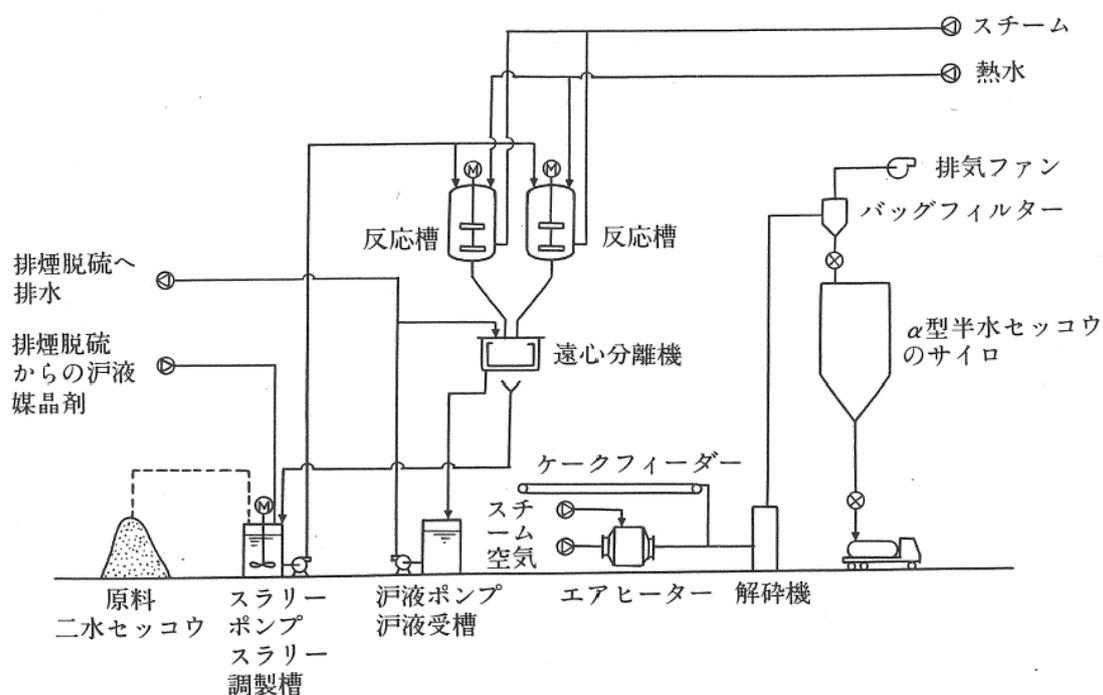


図 2.4-2 型半水石膏の連続製造工程 (加圧水溶液法)

2.5 諸外国における廃石膏ボードの処分・リサイクル状況

2.5.1 世界の石膏ボード市場

global gypsum Magazine September 2006 年1・2 合併号によると、世界の石膏ボードの総生産能力は約 79 億 m² で、アメリカが 34 億 6,500 万 m² で最も多く、世界の総生産能力のほぼ 45%を占めている。また、第 2 位は日本で 6 億 8,000 万 m² となっている。また、上位 10 カ国で世界の総生産能力の約 82%を占める。(実際の生産量は、生産能力の約 80%と推定される。)

2010 年 3 月現在の生産量はアメリカでは半減、日本は 30%減と推測((社)石膏ボード工業会ヒアリング結果より)

各国の 1 人当たりの石膏ボード使用量と、国別石膏ボード生産能力を次に示す。

表 2.5-1 1 人当たりの石膏ボード使用量

国・地域	使用量
アメリカ	11.4m ²
カナダ	10.0m ²
オーストラリア	8.0m ²
韓国	5.4m ²
日本	4.7m ²
北欧	6.5m ²
フランス	5.0m ²
イギリス	4.5m ²
ドイツ	3.9m ²
中国	0.3m ²
世界平均	1.1m ²

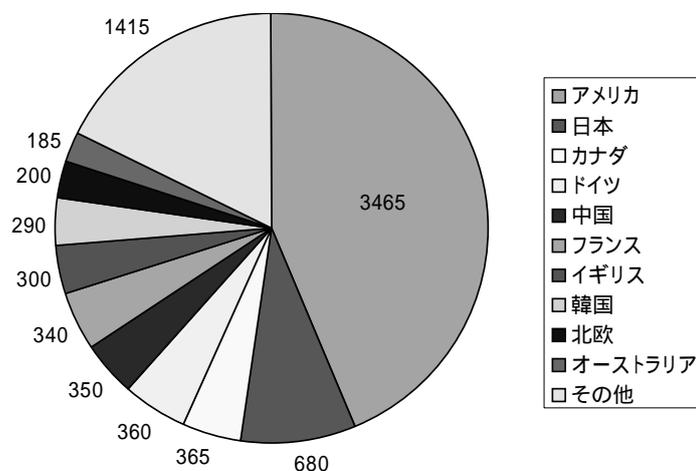


図 2.5-1 石膏ボードの生産能力上位 10 カ国 [×100 万 m²]

出典：global gypsum Magazine September 2006 年 1・2 合併号

2.5.2 米国の廃石膏ボードリサイクル状況

米国では、グリーンビルディング協議会が推進する「LEED 評価制度」により、環境負荷の少ない建築物の普及促進を図っており、廃石膏ボードを含む廃棄物の有効利用を促進している。(LEED : Leadership in Energy and Environmental Design)

米国における地域ごとの廃石膏ボードのリサイクル状況を次に示す。

表 2.5 - 2 米国の地域ごとの廃石膏ボードのリサイクル状況

地域	状況
北西部	<ul style="list-style-type: none"> ・北米で最もリサイクルの進んだ地域 ・埋立コストも高く、市場原理によりリサイクルが進む
北東部・ニューイングランド地方	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄や埋立コストが高くリサイクル意識は高いが、欧州ほどのリサイクル文化は確立されておらず、現場分別の徹底などの取組に対する意識は低い ・埋立地において硫化水素ガスが発生したため、行政はリサイクルの促進に積極的
カリフォルニア州	<ul style="list-style-type: none"> ・リサイクル意識は高いが石膏材料自体が低価格のため、原料としてのリサイクルは進んでいない ・農業利用など、新たな利用方法を検討中
フロリダ州	<ul style="list-style-type: none"> ・埋立地において硫化水素ガスが発生したため、行政はリサイクルの促進に乗り出しているが、埋立コストが低いため具体的には進んでいない
その他の州	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物処理コストが安く、リサイクルが進んでいない地域が多い

2.5.3 欧州の廃石膏ボードリサイクル状況

欧州では、2005年に制定したEU指令33により、廃石膏ボードは管理の厳しいタイプ2の埋立地（有機物との分離を徹底）への搬出が義務付けられた。

欧州における国・地域ごとの廃石膏ボードのリサイクル状況を次に示す。

表2.5-3 欧州の国・地域ごとの廃石膏ボードのリサイクル状況

国・地域	状況
北欧	<ul style="list-style-type: none"> ・民間企業によるリサイクルシステムを導入後、リサイクル率が向上（30%～70%の範囲で達成） ・埋立税の導入と住民の高いリサイクル意識によりリサイクルを促進
東欧	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物処理コストが低く、リサイクル意識が低い地域が多い
オランダ・ベルギー・スイス・オーストリア	<ul style="list-style-type: none"> ・北欧ほどのリサイクル文化はないが、政府としてはリサイクル促進に積極的 ・石膏ボードの使用量は北欧より少なく、建設現場での分別意識も北欧に比べ低い ・埋立税は4国共に課されている（オランダは欧州で最も高額）
ドイツ・フランス・南欧	<ul style="list-style-type: none"> ・ドイツは高いリサイクル率を達成している ・その他の国は埋立税も安いことからリサイクル文化が進んでなく、現場分別レベルも低い ・ドイツとフランスの製造業者は、石膏原料の再利用意識も高い

2.5.4 各国の廃石膏ボードリサイクル状況

(1) カナダのリサイクルの状況 (出典: Global Gypsum 誌 December2002-January2003)

1) 埋立処分の禁止

1980年代、埋立処分地において、地下水などで湿潤した石膏ボードからの侵出水や、硫化水素ガスの発生が問題になり、石膏廃材の埋立処分が禁止となる。

2) リサイクル事業

New West Gypsum Recycling 社では、製品の品質に影響を及ぼすことなく、バージン材料の25%まで再生品を利用している。また、次に示す技術や装置の開発を行っており、リサイクル事業を拡大している。

粉砕技術の開発

粉砕技術の特許を取得し、高含水率の廃石膏ボードの処理に成功した。

移動式処理装置の開発

広域な地域で発生する廃石膏ボードを、その場で処理可能な移動式の装置を開発した。ドライウォール現場やリサイクルセンターに設置することが可能で、処理能力は25t/hである。

(2) ドイツのリサイクル状況 (出典 : ZKG 誌、No.5-2007 vol160)

1) ドイツの廃石膏ボードの発生量

製造時 20,000 トン / 年 (生産量の 1 ~ 2 %)

新築時 60,000 トン / 年 (生産量の 3 ~ 6 %)

解体時 100,000 トン / 年 (生産量の 5 ~ 10 %)

2) リサイクルプラントの設置状況

埋立処分場不足と埋立処分費の高騰、環境関連法規制強化の関係で、ドイツには 3 つの廃石膏ボードリサイクルプラントが建設され、処理能力は各々 20,000 トン / 年で新築廃材の発生量に匹敵する。リサイクルプラントには新築廃材と一部分別解体廃材が搬入されている。リサイクルプラントの処理フローは、カナダの NWGR 社やデンマークの GRI 社と同じで、石膏パウダーと紙片に分離しリサイクルするものである。

3) リサイクル費用

埋立処分費が 200 ユーロ / t であるのに対し、リサイクルプラントに搬入した方が 10 ユーロ / t ほど安価な状況となっている。輸送距離 (運賃) の関係でどちらに搬入されるか決定される。

(3) スウェーデンのリサイクル状況

1) 環境政策・廃棄物政策

スウェーデンの環境政策・廃棄物政策の事例を次に示す。

1993年に廃棄物収集・処理法を改正し、生産者責任を強化。1994年に政府は企業に対して、「製造物責任法」を導入し、生産者は自社製品の廃棄後の処理責任を負う。2001年1月より埋立税を導入しており、2003年1月時点では40ユーロ/tである。環境政策の原則に「エコサイクル」を掲げ、リサイクルを推進している。

- ・ 予防の原則
- ・ 慎重さの原則
- ・ エコサイクルの原則
- ・ 利用可能な最良の技術使用の原則
- ・ 代替の原則
- ・ 内部化の原則
- ・ 持続可能な発展の原則

2) 現場分別に関する規定

現場分別に関する規定には次のようなものがある。

環境法で全ての建設工事は環境へ配慮することが規定されている。

環境省の下部組織である労働災害庁の規則により、コンクリート、金属、石膏ボード、プラスチック、電気製品の5種類を分別する義務がある。

3) 現場分別状況

木材は分別が義務付けられていないが、石膏ボードと混合すると処理費が高いため、現場分別が促進される要因となっている。分別した木材の処理コストは、石膏ボード混合物の1/5程度である。石膏ボードは、塗料等が付着していなければ、再度、石膏ボード工場（民間施設）でリサイクルされる。

(4) イギリスのリサイクル状況(出典: Global Gypsum 誌 November2007 P25~P28)

イギリスでは政府の方針として、建設廃材のマテリアルリサイクルについて取り組んできた。政府は「イギリスの廃棄物対策」を発行し、イギリスにおける全ての廃棄物の持続的管理と持続的建築対策のビジョンや優先する分野と進捗目標を示している。また、2012年までに建設廃棄物の埋め立て処分量を半減することを掲げている。

1) 廃石膏ボードの排出状況

イギリス(人口約6000万人)では現在、毎年約300万トンの石膏ボードが建設に使われており、詳しい統計には乏しいが毎年約30万トンの廃石膏ボードが端材として排出されていると推定されている。また、解体、改修現場からも廃石膏ボードが発生しており、その量は毎年60万トンに上ると推定されている。

2005年7月のEU埋立指令では、石膏ボードのような高硫黄分廃棄物の埋立処分に制限を設けた。また、一定量以上の廃石膏ボードを埋め立てる場合は危険性のない他の廃棄物と分離された区画の埋立処分場に埋め立てることを求めている。

2) 埋立削減

石膏ボードの埋立量を削減するために、石膏製品開発協会(会員はイギリスの石膏ボード会社3社: British Gypsum, Knauf Drywall, Lafarge Plasterboard)はイギリス政府に対して一連の自主的目標を提案した。これは2007年3月に合意したものである。この目標は2010年までに毎年10,000トンの石膏ボードの埋立量を削減するというものである。これは同時に新築廃材の50%を石膏ボードにリサイクルすることを意味している。

3) 最小化とリサイクル

廃棄物対策は3R(削減、再利用、リサイクル)に象徴される。廃石膏ボードの埋立処分量削減に最も効果的なものは発生量を最小化することである。これは建物の天井高さなどを一定に規格化し、石膏ボードの規格品を用いて端材が出ないようにすることで大きな効果を上げることができる。

Knauf Drywall社は、建設現場で分別された廃石膏ボードの回収計画を提案している。リサイクルされた廃材の石膏分は石膏ボードの原料として用いる。リサイクルされる廃石膏ボードは、異物の混入を防がなければならず、分別収集された新築端材のみをリサイクルの対象とすることも対策として考えられる。

4) 廃石膏の用途

Roy Hatfield 社は1時間 60 トンの処理能力で、廃石膏ボードを粉砕分離し、石膏パウダー89%、残渣（紙、ビニールクロスなど）11%とする処理を行っている。廃石膏の利用用途の一つはセメント原料であり、天然石膏の代替となる。もう一つの用途は石膏ブロックの製造である。石膏ブロックの生産量は年間 100 万トンであり、これに適用できる石膏パウダーは年間 9000 トンと推定される。その他、土壌固化材、土壌中和剤としての用途も期待されている。

5) 民営団体によるリサイクル

イギリスの民営団体であり 2000 年に設立された廃棄物政策実行組織、WRAP (Waste & Resource Action Program) による廃石膏ボード再利用研究事例を次に示す。

表 2 . 5 - 4 WRAP による廃石膏再利用研究事例

再利用方法	概要
セメント代替材	転炉スラグ微粉末に廃石膏粉と副産粉末を混入（配合比 = 80% : 15% : 5%）することで圧縮強度を発現。強度発現に時間がかかるため、転圧コンクリート舗装としての利用を期待。
コンクリートブロック製品	廃石膏ボードを混入したコンクリートブロック。リサイクル資源の確保と廃棄物の削減が見込まれ、経済と環境への効果を期待。
マッシュルーム栽培用堆肥	マッシュルームの堆肥に混ぜて利用。 健康や安全性などの検証が必要であるものの石膏廃棄物の新しい可能性を示している。商用化の実現を目指す。
難燃性の土と廃石膏ボードを材料とするブロック	難燃性の土と廃石膏を混合し、コンクリートブロック作成する試み。
斜面の安定化材(固化材)	土壌固化材として、斜面の傾斜を安定化させる試み。
セメント製造への利用	天然石膏に替わり、廃石膏ボードを全面的または部分的に使用する試み。
農業利用	カルシウムや硫黄不足を解消するために廃石膏粉を添加。無機窒素肥料の摂取促進効果も期待される。ジャガイモの栽培等に利用実績有り。

第3章 廃石膏粉の再利用用途及び改良後の基準

3.1 再利用分野の整理

(1) 再利用分野の種類

廃石膏の再利用用途を整理するにあたり、再利用の分野の整理を行った。再利用分野は、次の4つに区分して整理を行った。

- 1) 原料利用：石膏ボード、セメントの原料としての利用
- 2) 土木資材：地盤安定化資材、ため池堤体遮水材、アスファルト・フィラーなどの土木工事での利用
- 2) 農業：肥料としての利用
- 3) その他：魚礁・増殖礁ブロックへの添加材としての利用
学校などでの白線用（ライン引き）粉末としての利用

表3.1-1 再利用分野及び再利用用途

再利用分野	再利用用途		概要
原料利用	石膏ボード原料		石膏ボード原料として利用
	セメント原料		セメント原料として利用
土木資材	地盤安定化資材	地盤改良用	軟弱地盤の強度を高め、沈下や滑り破壊の抑制に使用される材料として利用
		建設発生土改良用	建設工事などから発生した低品質の土砂を改良する材料として利用
	ため池堤体遮水材		老朽化したため池の改修に使用される材料として利用
	アスファルト・フィラー		道路の表面舗装材であるアスファルト混合物の見かけの粘度を高め、骨材として混合物の空隙を充填する材料として利用
農業	肥料		石膏の性質を応用し、肥料として利用
その他	魚礁・増殖礁ブロック		魚礁・増殖礁ブロックへの添加材として利用
	白線用粉末		白線用（ライン引き）の粉末として使用

(2) 各再利用分野の利用状況の概要

1) 原料としての利用

石膏ボード原料

石膏ボードメーカーでは石膏製造時における廃石膏の投入量を制限しており、現状では原料となる石膏の重量比 10% を上限の目安としている。

セメント原料

セメント原料としては、セメント製造時の仕上げ工程の凝結調整剤として石膏が使用されている。再利用の現状としては、天然石膏及び排煙脱硫石膏の利用が主流であり、業界として積極的に利用できる状況ではない。

2) 土木資材としての利用

地盤安定化資材

軟弱地盤の強度を高め、沈下や滑り破壊の抑制に使用される地盤改良材や、建設工事などから発生した低品質の土砂を改良する建設発生土改良材として土質の安定処理を行う。セメント系改良材や、石灰系改良材の代替として利用が期待される。

ため池堤体遮水材

老朽化したため池堤体の改修に使用される材料として利用する。改修が必要なため池は全国に点在しており、セメントや石灰とともに遮水材としての利用が期待される。

アスファルト・フィラー

アスファルト混合物の粘度を高め、骨材として混合物の空隙を充填するフィラーとして利用する。現在、石粉の利用が大多数を占めており、廃石膏での代替が期待される。

3) 農業利用

土壌に施用した際に pH の上昇を伴わない、カルシウム、硫黄を含むという特徴を持ち、広範な農業利用が期待できる。大規模農場での利用など、使用範囲が広がれば多量の廃石膏の利用が期待できる。

4) その他

魚礁・増殖礁ブロック

漁場の形成や海草・藻類の繁殖を促進するために、海底に沈めるコンクリート製ブロックへの添加材として利用する。廃石膏を添加することで、海洋中においての効果が認められれば、大いに利用が期待できる。

白線用粉末

学校等での白線用（ライン引き）粉末としての利用。使用範囲が広がれば多量の廃石膏の利用が期待できる。

3.2 土木資材での再利用用途

上記3.1で整理した再利用分野のうち、大量の廃石膏の利用が期待できる土木資材について再利用用途の調査を行った。調査結果を次に示す。

3.2.1 地盤安定化資材

(1) 地盤安定化資材の概要

地盤安定化資材の種類としては、主に次の3種類が挙げられる。

セメント系安定化資材

セメントに廃石膏を加熱処理して半水石膏化したものが一定の割合で添加されている資材。セメント系資材は固化力（強度）が強いため、軟弱地盤でのニーズが高く、既に販売実績も豊富である。

石灰系安定化資材

石灰の補助材として石膏が一定の割合で添加された資材。石灰系安定化資材は固化力がセメント系安定化資材に比べると弱く、用途が限定的であることから、国等の公共工事での使用が中心であると言われている。

石膏系安定化資材

石膏系安定化資材は、廃石膏粉を加熱処理して得た半水石膏や無水石膏と未処理の二水石膏を一定割合で混合させた資材。他の固化材と異なり、施工時に土壤の水素イオン濃度（pH）を変えない中性の資材であることから、安定化資材の使用者からのニーズは高いが、石灰安定化資材と同様に施工時にフッ素の溶出に対する対策が求められる。

(2) 地盤安定化資材の活用方法

地盤安定化資材の適用工法や適用可能な現場の種類について整理を行った。

- 1) 掘削前の適用工法：利用しようとする土を掘削前に土質改良する工法。
- 2) 掘削した発生土への適用工法：掘削後に土質改良を行う工法。発生土の掘削地、中間処理地、利用場所等いずれにおいても活用可能である。
- 3) 利用時における適用工法：発生土を利用する場所において直接活用する工法。

(3) 廃石膏を使用する際の優位性・留意点

地盤安定化資材に廃石膏を使用する際の優位性や留意点などを、改良材メーカーに対するヒアリングおよび、研究論文等の調査結果から整理を行った。整理結果を次に示す。

表3.2-1 地盤安定化資材として廃石膏を使用する際の優位性と留意点

項目		概要
廃石膏を使用することの優位性	半水石膏は高有機質土においても有効	高有機質土を用いた試験の結果、半水石膏の固化材添加率の増加に伴い、強度が増加する ¹
	石膏系固化材に中和能力あり	石灰系固化材に石膏系固化材を加えた場合、石灰系固化材のみの場合よりもpHの低下が見られた ²
廃石膏を活用する際の留意点	フッ素の溶出について	フッ素は環境基準値を超える溶出が懸念される ³ (フッ素の溶出抑制を施すことで、環境基準値に適合可能(0.8mg以下/L) ²)

出典：¹半水石膏による高含水比発生土の地盤改良効果の検討(福岡大学：佐藤研一，押方利郎)

²港湾浚渫土の粒状固化における石膏系固化材の適用性について(株アイコ：今山真治，中村吉男)

³再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価(長崎大学：棚橋由彦)

3.2.2 ため池堤体遮水材

(1) ため池堤体遮水材の概要

1) ため池の分布状況

ため池は西日本を中心に全国に分布しており、全国に約21万箇所存在している。特に、瀬戸内地域では降水量が少ないことから、古くからため池が造られ、全国の約6割が所在している。

表3.2-2 都道府県ごとのため池の数

No.	都道府県名	箇所数	No.	都道府県名	箇所数
1	兵庫県	47,596	6	岡山県	10,304
2	広島県	20,910	7	宮城県	6,074
3	香川県	15,990	8	和歌山県	5,925
4	山口県	11,785	9	新潟県	5,822
5	大阪府	11,308	10	島根県	5,782

出典：農林水産省 農村振興局資料

2) ため池の老朽化

多くのため池が老朽化により漏水、侵食等の危険箇所が発生し、大雨や地震を契機に決壊する恐れがある。



堤体の侵食が著しいため池



被災したため池

(2) ため池堤体の種類

堤体改修型式には、均一型、ゾーン型（傾斜遮水ゾーン型、中心遮水ゾーン型）、表面遮水壁型（遮水シート）、堤体グラウト型などがある。表3.2-3に堤体改修形式の比較を示す。

表 3. 2 3 堤体改修形式の比較

型 式	略 図	定 義	特 性	
均一型		堤体の全断面で遮水する型式、または堤体の最大断面で均一の材料の占める割合が80%以上である型式。	全断面がほぼ同一材料のため施工が容易である。ゾーン型の遮水性材料よりいくぶん透水性の高い材料でも使用できる。ゾーン型に比して一般に法面勾配は緩傾斜となり堤体積が増大する。全体が粘性土の場合は、施工中に堤体内部に発生する間隙圧が消散しにくく安定性が悪くなるので、内部にドレーンを設置する必要がある。	
ゾーン型	傾斜遮水ゾーン型		土質材料が遮水性材料と半透水性または透水性材料からなる型式で、遮水性ゾーンが上流側へ傾斜したものの。	遮水性材料の占める割合は少ないので遮水性ゾーンの間隙圧の消散は早い。遮水性ゾーンの施工は、均一型に比して施工が難しいので、慎重に行なう必要がある。遮水性ゾーンが上流側に傾斜しているため、堤体改修型式には適す。ため池改修工事においては、最も一般的な型式。
	中心遮水ゾーン型		土質材料が遮水性材料と半透水性または透水性材料からなる型式で、遮水性ゾーンを堤体中心に設けるもの。	遮水性材料が占める割合は少ないので遮水性ゾーンの間隙圧の消散は早い。遮水性ゾーンの施工は、均一型に比して施工が難しいので、慎重に行なう必要がある。遮水性ゾーンを堤体の中心部に設けるため、堤体改修型式に不適であるが、全面改修または新設する場合は、傾斜遮水ゾーン型に比して施工が容易である。
表面遮水壁型	遮水シート		堤体が透水性または半透水性材料からなり、上流側法面にシートを設け遮水する型式。	堤体盛土材料に遮水性材料が得られない場合に採用されることが多い。堤体の大部分に剪断強さの大きい透水性材料が使用でき、堤体積を少なくすることができる。遮水シートと土および構造物との接着部を特に入念に施工する必要がある。また異物による破損を防ぐため、張ブロックの内側に遮水シートを併設する場合もある。 合成ゴム系、合成樹脂系等の各種シートがある。
	アスファルト舗装		堤体が透水性または半透水性材料からなり、上流側法面にアスファルト舗装を施工し遮水する型式。	堤体盛土材料に遮水性材料が得られない場合に採用されることが多い。堤体の大部分に剪断強さの大きい透水性材料が使用でき、堤体積を少なくすることができる。一般的に、遮水壁材料が高価である。
堤体グラウト型		堤体材料が透水性または半透水性材料からなり、堤体の中心部にグラウト工を施工し遮水する型式。	現況堤体にグラウト工を施工し遮水する型式で、堤体盛土材料に遮水性材料が得られず、また、漏水経路等が明らかな場合に行われる型式。	

出典：土地改良事業設計指針（農林水産省農村振興局）

(3) 廃石膏を使用する際の優位点・留意点

ため池堤体遮水材に廃石膏を使用する際の優位性や留意点などを、改良材メーカーに対するヒアリングおよび、研究論文等の調査結果から整理を行った。整理結果を次に示す。

表3.2-4 ため池堤体遮水材として廃石膏を使用する際の優位性と留意点

項目		概要
廃石膏を使用することの優位性	廃石膏の添加量や養生期間、風乾により強度の増加が可能	再生石膏は土壌含水比を低下させるため、添加量や養生期間を長くすることで、固化材としての効果がより顕著になる
廃石膏を活用する際の留意点	フッ素の溶出について	石膏ボードは中性材料であるため、土壌中の pH への影響は少ないが、フッ素の溶出が懸念されるため、抑制方法を検討する必要がある

出典：再生石膏中性固化材の地盤改良材としての適用性評価（長崎大学：棚橋由彦）

3.2.3 アスファルト・フィラー

(1) アスファルト・フィラーの概要

アスファルト・フィラーは、アスファルトと一体となって骨材の間隙を充填し、混合物の安定性や耐久性を向上させる添加剤であり、現在は石粉の利用が大部分を占めている。

フィラー量は安定性や耐久性のほか、施工性にも影響を与えるため、配合設計において総合的に検討される因子の一つとなる。

(2) アスファルト・フィラーの種類

石灰石を粉砕した石粉が最も多く用いられている。その他の種類としては、消石灰、セメント、回収ダスト、フライアッシュおよび石灰岩以外の岩石を粉砕したのものがある。

(3) 副産物等をフィラーとして用いる場合の考え方

副産物等をフィラーとして用いる場合は、副産物等採用の考え方（出典：アスファルト舗装要綱（（社）日本道路協会）に基づき、検討を行う。

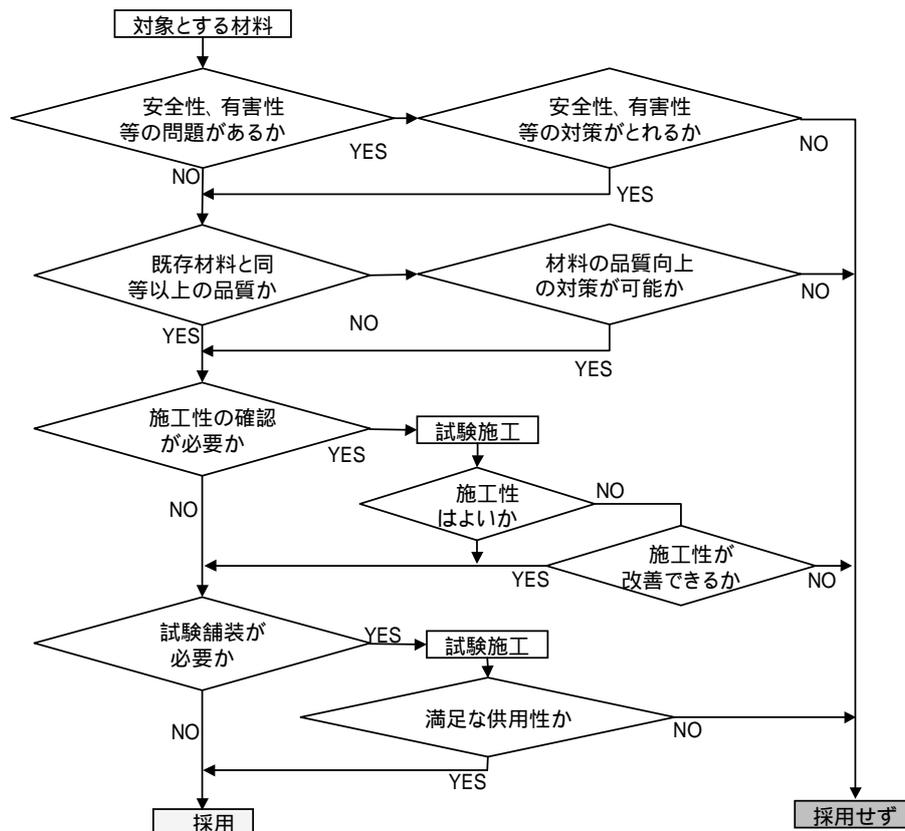


図 3.2-1 副産物等採用の考え方

(4) 廃石膏を使用する際の優位性・留意点

アスファルト・フィラーに廃石膏を使用する際の優位性や留意点などを、改良材メーカーに対するヒアリングおよび、研究論文等の調査結果から整理を行った。整理結果を次に示す。

表3.2-5 アスファルト・フィラーとして廃石膏を使用する際の優位性と留意点

項目		概要
廃石膏を使用することの優位性	石粉代替に廃石膏を用いた場合の安定性	バインダにストレートアスファルトを用いた混合物は、廃石膏置換率が増大するにしたがって、安定度が大きくなる ¹
	汎用性の多い配合に対して代替可能	汎用性の高い6種類の配合(粗粒度アスコン等)について配合設計を行った結果、廃石膏添加量が増加するにつれて、安定度が増加する傾向を示した ¹
	無水石膏の利用による添加量の増大	加熱処理を行った無水石膏を利用することで、フィラーとして100%置換することが可能 ²
廃石膏を活用する際の留意点	二水石膏を利用する場合の添加量の抑制	二水石膏は容易に水に溶解するため、剥離抵抗性の低下が懸念される。そのため、置換率は50%以下に抑えるべきである ¹
	プラント混合する場合、混合温度は通常より15程度高めに設定する必要がある	廃石膏は20%程度含水しているため、水分蒸発による温度低下が懸念される ¹

出典：¹石膏ボード廃材の加熱混合用アスファルトコンクリートへの適用(山口大学：松尾栄治)

²廃石膏ボードの破碎処理物のアスファルトフィラー材としての再資源化(広島工業大学：今岡務)

3.3 再利用用途ごとの要求品質

廃石膏の再利用用途として、地盤安定化資材、ため池堤体遮水材、アスファルト・フィルターについて、製品に要求される品質の整理を行った。

3.3.1 地盤安定化資材の要求品質

(1) 発生土適用用途ごとの要求品質

適用用途ごとの建設発生土の要求品質を表3.3-1に整理した。求められる含水比、強度などの要求品質は、適用される用途により異なる。なお、ここで整理した要求品質は参考であり、実際の適用にあたっては利用側で定められている諸基準等に従う必要がある。

表 3.3 1 用途ごとの要求品質

用途	工作物の埋め戻し	土木構造物の裏込め	道路用盛土		河川築堤		土地造成		水面埋立		
			路床	路体	高規格堤防	一般堤防	宅地造成	公園・緑地造成			
用途ごとの要求品質	材料規定	最大粒径	50mm以下	(100mm以下)	-	-	100mm以下	(150mm以下)	100mm以下 (転石300mm以下)	-	-
		粒度	Fc 25%	(細礫分 25%) (Fc 25%)	-	-	Ø37.5mm以上の混入率40%以下	(FC=15~50%)	Ø37.5mm以上の混入率40%以下	-	-
		コンシステンシー	-	(PI 10)	-	-	-	-	-	-	-
		強度	規定のCBR以上	圧縮性の小さい材料	規定のCBR以上	-	qc 400kN/m ²	-	qc 400kN/m ² 場合により qc 200kN/m ²	-	-
	施行管理規定	施行含水比	監督員の指示	最適含水比とDc90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比とDc90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比とDc90%の得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比より湿潤側で、規定の乾燥密度が得られる範囲	Dc 90%の締固め度が得られる湿潤側の含水比の範囲	最適含水比に近い状態	-	-
		締固め度	Dc 90%	Dc 90~95%	Dc 90~95%	Dc 90%	RI計器: 締固め度平均値 Dc 90% 砂置換法: 締固め度最低値 Dc 85%	平均締固め度: Dc 90% 締固め度品質 下限: 値:Dc 80%	RI計器: Dc 87% 砂置換法: Dc 85%	-	-
		空気間隔率 または飽和度	-	-	-	粘性土Va 10% Sr 85% 砂質土Va 15%	粘性土 Va=2 10% Sr=85~95% 砂質土 Va 15%	粘性土 Va=2 10% Sr=85~95% 砂質土 Va 15%	RI計器: Va 13% 砂置換法: Va 15%	-	-
		1層の仕上り 厚さ	30cm 路床部 20cm以下	20cm以下	20cm以下	30cm以下	30cm以下	30cm以下	まき出し厚さ 30~50cm	-	-
		その他	-	-	-	-	qc 400kN/m ²	-	-	-	-
		基準等	建設省: 「建設省総合プロジェクト外建設事業への廃棄物利用技術の開発概要報告書」, 昭和61年11月	社団法人日本道路協会: 「道路土工-施工指針 改訂版」, 昭和61年11月	社団法人日本道路協会: 「道路土工-施工指針 改訂版」, 昭和61年11月	社団法人日本道路協会: 「道路土工-施工指針 改訂版」, 昭和61年11月	財団法人リバーフロント整備センター: 「高規格堤防盛土設計・施工マニュアル」, 平成12年3月	財団法人国土開発技術研究センター: 「河川土工マニュアル」, 平成5年6月	都市基盤整備公団: 「工事共通仕様書」, 平成12年9月	-	-

凡例 Rc:細粒分含有率 Dc:締固め度 Sr:飽和度
 PI:塑性指数 Dc:平均締固め度 -:特に限定なし
 qc:コーン指数 Va:空気間隔率 ():望ましい値

【出典】建設発生土利用技術マニュアル((独)土木研究所)

(2) 土質区分基準

発生土の改良を行った場合は、改良後の性状で土質区分を判定するものとする。発生土の土質区分は、原則として、コーン指数と土質材料の工学的分類体系((社)地盤工学会)を指標とし、表3.3-2に示す土質区分基準によるものとされている。

表3.3-2 土質区分基準

区分 (国土交通省令)	細区分	コーン指数 qc (kN/m ²)	土質材料の工学的分類		含水比 (地山) Wn(%)	備考 掘削方法	
			大分類	中分類 土質(記号)			
第1種建設発生土 (砂、礫及びこれら に準ずるもの)	第1種	-	礫質土	礫(G)、砂礫(GS)	-		
	第1種改良土		砂質土	砂(S)、礫質土(SG)			
第2種建設発生土 (砂質土、礫質土及び これらに準ずるもの)	第2a種	800以上	人工材料	改良土(I)	-		
	第2b種		礫質土	細粒分まじり礫(GF)			
	第2種改良土		砂質土	細粒分まじり砂(SF)			
第3種建設発生土 (通常の施工性が確保 される粘性土及びこれ らに準ずるもの)	第3a種	400以上	人工材料	改良土(I)	-		
	第3b種		砂質土	細粒分まじり砂(SF)			
	第3種改良土		粘性土	シルト(M)、粘土(C)			40%程度以下
			火山灰質粘性土	火山灰質粘性土(V)			-
第4種建設発生土 (粘性土及びこれらに 準ずるもの (第3種建設発生土 を除く))	第4a種	200以上	人工材料	改良土(I)	-		
	第4b種		砂質土	細粒分まじり砂(SF)			
	第4種改良土		粘性土	シルト(M)、粘土(C)		40～80%程度	
			火山灰質粘性土	火山灰質粘性土(V)		-	
泥土	泥土a	200未満	有機質土	有機質土(O)	40～80%程度		
			人工材料	改良土(I)	-		
	泥土b		砂質土	細粒分まじり砂(SF)	-		
			粘性土	シルト(M)、粘土(C)	80%程度以上		
泥土c	火山灰質粘性土	火山灰質粘性土(V)	-				
	有機質土	有機質土(O)	80%程度以上				
			高有機質土	高有機質土(Pt)	-		

- *1) 国土交通省令(建設業に属する事業を行う者の再生資源の利用に関する判断の基準となるべき事項を定める省令平成13年3月29日国交令59、建設業に属する事業を行う者の指定副産物に係る再生資源の利用の促進に関する判断の基準となるべき事項を定める省令平成13年3月29日国交令60)においては区分として第1種～第4種建設発生土が規定されている。
- *2) この土質区分基準は工学的判断に基づく基準であり、発生土が産業廃棄物であるか否かを定めるものではない。
- *3) 表中の第1種～第4種改良土は、土(泥土を含む)にセメントや石灰を混合し化学的安定処理したものである。例えば第1種～第3種改良土は、第4種建設発生土または泥土を安定処理し、コーン指数400kN/m²以上の性状に改良したものである。
- *4) 含水比低下、粒度調整などの物理的な処理や高分子系や無機材料による水分の土中への固定を主目的とした改良材による土質改良を行った場合は、改良土に分類されないため、処理後の性状に応じて改良土以外の細区分に分類する。
- *5) 所定の方法でモールドに締め固めた試料に対し、コーンペネトrometerで測定したコーン指数(表-2参照)。
- *6) 計画段階(掘削前)において発生土の区分を行う必要があり、コーン指数を求めるために必要な試料を得られない場合には、土質材料の工学的分類体系((社)地盤工学会)と備考欄の含水比(地山)、掘削方法から概略の区分を選定し、掘削後所定の方法でコーン指数を測定して区分を決定する。
- *7) 土質材料の工学的分類体系における最大粒径は75mmと定められているが、それ以上の粒径を含むものについても本基準を参照して区分し、適切に利用する。
- *8) 砂及び礫と同等の品質が確保できているもの。
- *9) ・港湾、河川等のしゅんせつに伴って生ずる土砂その他これに類するものは廃棄物処理法の対象となる廃棄物ではない。(廃棄物の処理及び清掃に関する法律の施行について 昭和46年10月16日環整43厚生省通知)
・地山の掘削により生じる掘削物は土砂であり、土砂は廃棄物処理法の対象外である。(建設工事等から生ずる廃棄物の適正処理について 平成13年6月1日環廃産276環境省通知)
・建設汚泥に該当するものについては、廃棄物処理法に定められた手続きにより利用が可能となり、その場合「建設汚泥処理土利用技術基準」(国官技第50号、国官総第137号、国営計第41号、平成18年6月12日)を適用するものとする。

出典:「発生土利用基準について」(平成18年8月10日 国官技第112号、国官総第309号、国営計第59号)

3.3.2 ため池堤体遮水材の要求品質

(1) 堤体盛土材料の要求品質

堤体盛土材料は、必要な水密性及び強度を有し、かつすべり破壊又は浸透破壊が生じないものである必要がある。

表3.3-3 堤体盛土材料使用区分の目安

項目		目安・判定方法
水密性	粒度分布	高い密度を与える粒度分布であり、適度に細粒分が含まれていること。
	コンシステンシー	収縮性が小さく、適度の塑性を有すること。
	比重	2.6以上であれば、概ね問題なし。(2.6以下であれば有機質を含んでいる可能性がある。)
	透水性	1×10 ⁻⁵ cm/s を目標とするが、達成困難な場合は、少なくとも現場にて締固めた状態の透水係数が5×10 ⁻⁵ cm/sを上限として緩和することが可能。 (室内試験値は5×10 ⁻⁶ cm/s以下とする)
強度	標準突固め	材料の透水性、強度、施工性を判定する。
	せん断強さ	見掛けの粘着力と内部摩擦角で表されるが、安定解析を行う場合には三軸圧縮試験により求める。

出典：「土地改良事業設計指針」(農林水産省農村振興局)

(2) 堤体基礎地盤の要求品質

堤体の基礎地盤は、所要の支持力及び水密性を有しなければならず、条件に適合しない基礎地盤に対しては処理を施す必要がある。なお、堤高等の堤体断面形状を決定する上で基準となる基礎地盤面は、現況堤体の改修であることから、築堤当時の現地盤面と考えるのが適当であるため、堤体の基礎地盤は、機械施工が可能な支持力を必要とする。

表3.3-4 堤体基礎地盤の品質の目安

項目		目安・判定方法
支持力	コーン貫入抵抗 q_c	ポータブルコーン貫入試験で得られる500kN/m ² 程度
水密性	透水係数 k	k 1×10 ⁻⁴ cm/s が望ましい

出典：「土地改良事業設計指針」(農林水産省農村振興局)

3.3.3 アスファルト・フィラーの要求品質

(1) アスファルト・フィラーの品質基準

石灰岩を粉砕した石粉以外のフィラーを用いるときは、針入度試験、フロー試験、吸水膨張試験、剥離試験を行い、その性状を把握することとされている。

表 3.3 - 5 石粉の粒度規格

ふるい目	通過質量百分率 (%)
600 μ m	100
150	90 ~ 100
75	70 ~ 100

出典：「アスファルト舗装要綱」(社)日本道路協会)

表 3.3 - 6 フィラーの品質目標値

項目 \ 資材	回収ダスト	フライアッシュ、石灰岩以外の 岩石を粉砕した石粉
PI (針入度指数)	4 以下	4 以下
フロー試験 (%)	50 以下	50 以下
吸水膨張 (%)	-	3 以下
剥離試験	-	合格

出典：「アスファルト舗装要綱」(社)日本道路協会)

3.4 再利用用途ごとの潜在需要量の推計

地盤安定化資材とアスファルト・フィラーについて、廃石膏を使用した場合、どの程度の需要が見込めるか、現在の利用量等から推測を行った。

3.4.1 地盤安定化資材の潜在需要量

(1) 全国における建設発生土の搬出・利用状況

平成17年度建設副産物実態調査（国土交通省）結果によると、建設工事から発生した土砂の国内の年間利用量は、搬入土砂利用と現場内利用を合わせて年間 23,367 万 m³ 程度となっている。

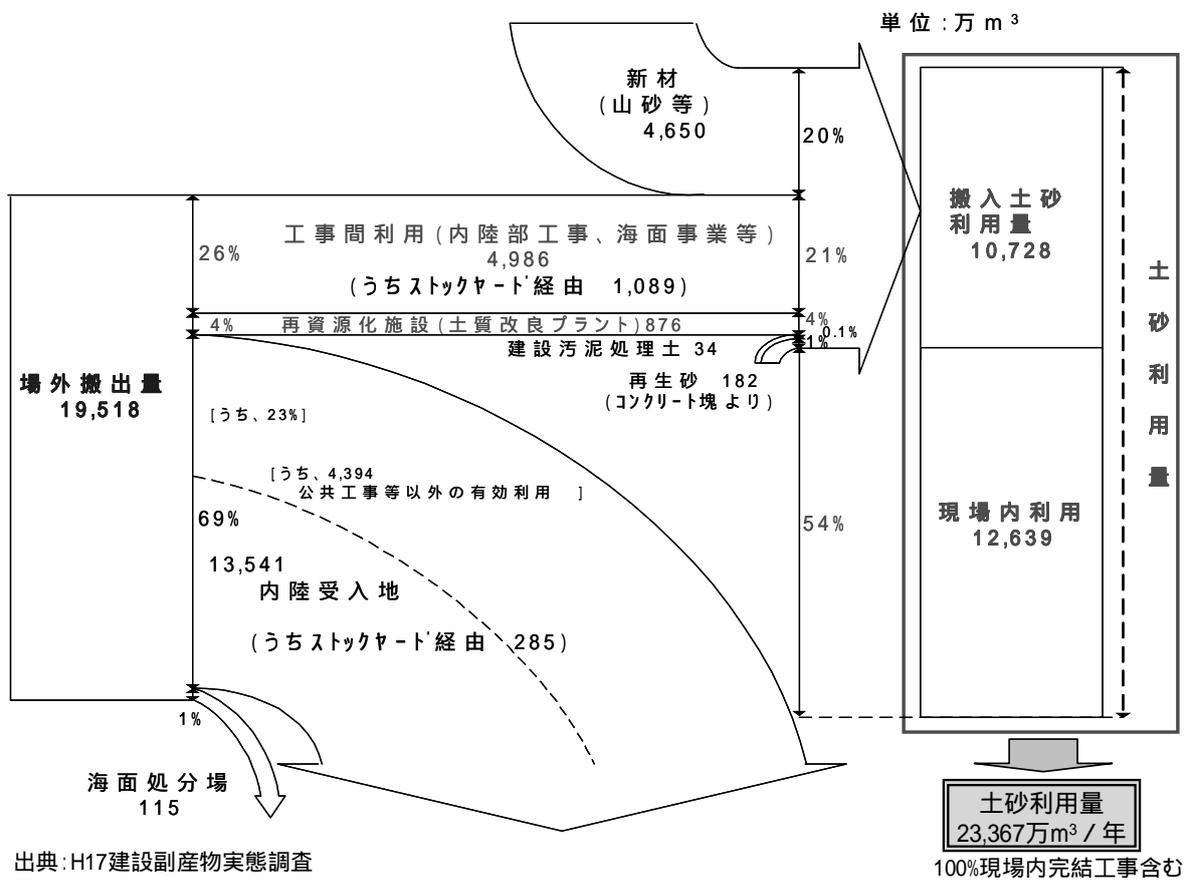


図3.4-1 場外搬出された土砂の利用先フロー

(2) 地盤安定化資材の需要量の推計

上記(1)の国内年間の土砂利用量を基に、改良が必要な建設発生土と改良に使用される廃石膏の年間使用量を推計した。

推計に使用した仮定条件を次に示す。

表3.4-1 地盤安定化資材需要量の推計に用いた仮定条件

項目	仮定
改良が必要な建設発生土	第4種建設発生土及び泥土の全搬出量が全体の8%程度 ¹ であることから、改良が必要な建設発生土を全体の8%とする。
改良に使用する廃石膏の添加率	研究機関や民間企業における廃石膏を使用した地盤安定化資材の研究事例から、改良に使用する廃石膏の添加率を10%(重量比)として推計する。

出典：¹建設発生土等有効利用必携「全国の建設発生土等の土質区分と土砂利用の対比」

これらの仮定条件を使用し、需要量を計算すると、地盤安定化資材として年間に最大337万tの廃石膏を再利用することが可能である。

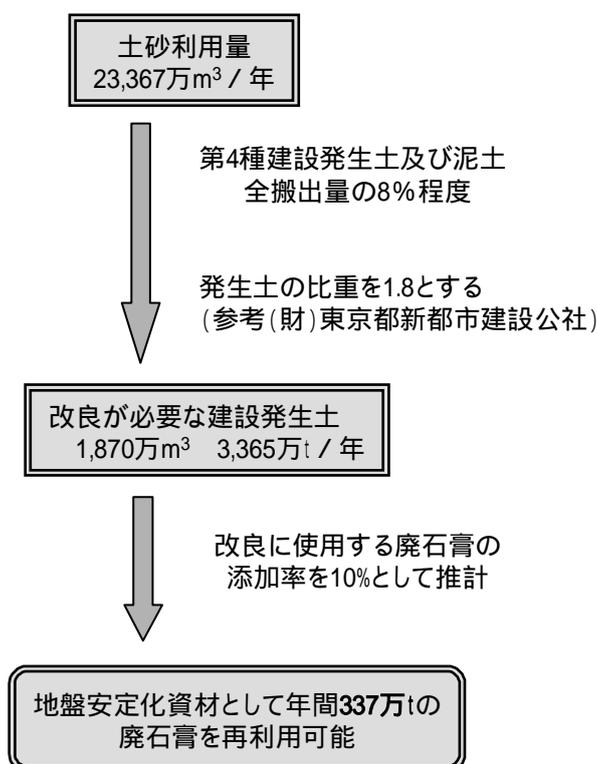
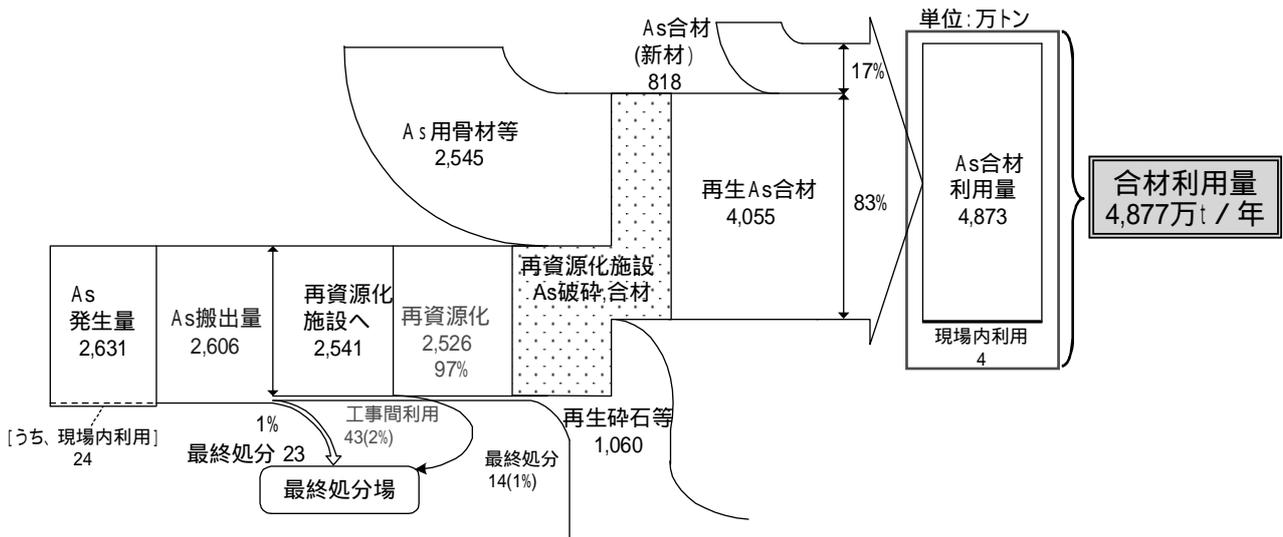


図3.4-2 地盤安定化資材としての廃石膏利用量の推計

3.4.2 アスファルト・フィラーの潜在需要量

(1) 全国におけるアスファルト合材の搬出・利用状況

平成17年度建設副産物実態調査（国土交通省）結果によると、建設工事で使用されるアスファルト合材は、新材と再生材を合わせて年間4,877万t利用されている。



出典: H17建設副産物実態調査

図3.4-3 アスファルト合材の利用量

(2) アスファルト・フィラーの需要量の推計

アスファルト合材の国内年間利用量を基に、アスファルト・フィラーの年間利用量を推計し、廃石膏をフィラー材として利用した場合の需要を推計した。

推計に使用した仮定条件を次に示す。

表3.4-2 アスファルト・フィラー需要量の推計に用いた仮定条件

項目	仮定
アスファルト合材中に対するアスファルト・フィラーの添加率	アスファルト合材統計年報によると、石灰石を粉砕した石粉の添加量はアスファルト合材の2.8%（重量比）であることから、アスファルト・フィラーの添加率を2.8%とした。
既存フィラーに対する廃石膏の置換率	既存のフィラーを廃石膏（二水石膏）で全て代替した場合、アスファルト安定度試験規格を満足できないという研究成果を基に、既存のアスファルト・フィラーの50%を置換すると仮定した。 （なお、無水石膏を利用することで100%置換することが可能であるとの研究成果があるが、処理コスト等を勘案し、ここでは二水石膏の利用を想定し、条件を設定した。）

出典：石膏ボード廃材の加熱混合用アスファルトコンクリートへの適用（山口大学：松尾栄治）

これらの仮定条件を使用し、需要量を計算すると、アスファルト・フィラーとして年間に最大70万tの廃石膏を再利用することが可能である。

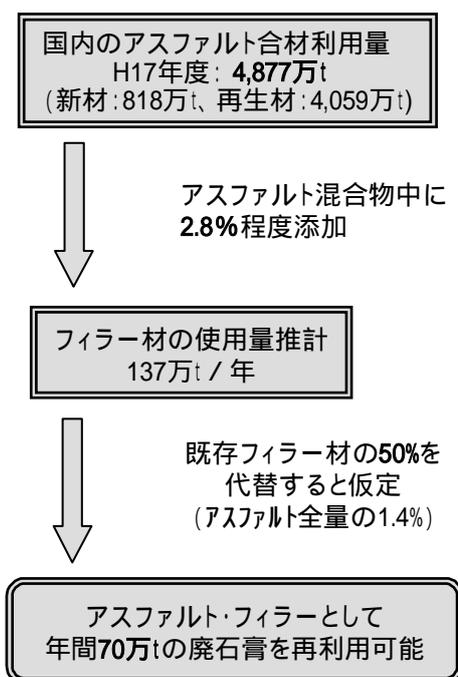


図3.4-4 アスファルト・フィラーとしての廃石膏利用量の推計

3.5 再利用用途ごとの汎用されている資材

地盤安定化資材、ため池堤体遮水材、アスファルト・フィラーについて、現在の流通している製品の出荷量、使用量を整理した。

(1) 地盤安定化資材、ため池堤体遮水材

地盤安定化資材やため池堤体遮水材は、現在、セメントや石灰を使用した固化材が主流である。また、それら資材と置き換えが想定されるものとして、鉄鋼スラグ微粉末や電気炉還元スラグ微粉末があり、廃石膏粉の競合品としてなり得るものである。

1) 汎用されている地盤安定化資材

地盤安定化資材として現在流通している製品には、次のようなものがある。

表3.5-1 地盤安定化資材として汎用されている資材

製品	出荷量 (平成20年度)
セメント系固化材	238万t
石灰系固化材	77万t
合計	315万t

出典:(社)セメント協会、日本石灰協会へのヒアリング

2) セメント系固化材の市場規模

地盤安定化資材として汎用されている製品のうち、出荷量の多いセメント系固化材について需要量の推移について調査を行った。調査結果を次に示す。

表3.5-2 セメント系固化材の需要量推移

単位:t

	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
北海道	159,267	224,339	214,385	157,586	123,404	117,650	103,637	132,420	135,337	145,356	132,357
東北	467,887	560,396	589,898	500,657	455,093	510,477	503,538	525,586	566,681	510,073	523,683
関東	1,847,502	1,847,169	1,849,166	1,886,262	1,841,231	1,875,087	1,985,343	2,049,340	2,265,918	2,074,420	2,306,630
北陸	483,526	593,124	551,599	503,148	516,307	525,404	580,143	682,322	721,230	683,789	706,917
東海	744,668	753,730	845,779	765,577	814,800	921,343	935,848	950,268	1,136,703	1,093,617	1,233,609
近畿	1,097,759	1,068,017	984,695	956,651	1,001,121	1,004,023	1,049,280	1,003,969	1,013,249	1,018,672	1,031,723
四国	113,665	130,504	103,001	101,441	89,758	117,832	98,841	131,731	100,711	103,821	86,958
中国	366,825	429,880	354,764	308,419	315,613	307,324	345,444	283,686	348,925	352,588	339,971
九州・沖縄	523,756	551,851	509,020	468,717	424,620	461,222	466,153	516,475	563,556	555,714	524,446
計	5,804,855	6,159,010	6,002,307	5,648,458	5,581,947	5,840,362	6,068,227	6,275,797	6,852,310	6,538,050	6,886,294

出典:セメント協会統計データ

3) 置き換えが想定される競合品

現在、汎用されているセメント系固化材や石灰系固化材と置き換えが想定される資材について整理し、廃石膏を使用する際の競合品となり得る資材の把握を行った。整理結果を次に示す。

3.5-3 セメント系固化材、石灰系固化材と置き換えが想定される資材

資材	概要
鉄鋼スラグ微粉末	鉄鋼製造工程において副産物として発生するもの。銑鉄を製造する高炉で溶融された鉄鉱石の鉄以外の成分は、副原料の石灰石やコークス中の灰分と一緒に高炉スラグとなり分離回収される。
電気炉還元スラグ微粉末	酸化精錬終了後酸化スラグを排出し、新たに還元剤、石灰等を装入し溶鋼中の酸素を除去する還元精錬時に生成するスラグ。 還元スラグの化学成分はセメントの化学成分に比較的近く、水硬特性をもつことが確認されている。

出典：「土質改良材としての製鋼スラグの強度改善効果について」(明石工業高等専門学校)
「電気炉還元スラグによる軟弱土の改良」(大同特殊鋼(株)技術開発研究所)

(2) アスファルト・フィラー

アスファルト・フィラーは、現在、石灰石を粉砕した石粉の利用が主流であり、全体の98%程度を占めている。その他、消石灰やセメント、フライアッシュが使用されている。また、これらの資材と置き換えが想定されるものとして、電気炉製鋼還元スラグダストや下水汚泥焼却灰等が想定され、廃石膏粉の競合品となり得るものである。

1) 汎用されているアスファルト・フィラー

アスファルト・フィラーとして現在流通している製品には、次のようなものがある。

表3.5-4 アスファルト・フィラーとして汎用されている製品

製品	年間出荷量・使用量
石灰石を粉砕した石粉	94万t(平成20年度使用量)
消石灰	1.5万t(平成20年度)
セメント	微量
フライアッシュ	0.9万t(平成19年度)
合計	95.9万t

出典：アスファルト舗装要綱((社)日本道路協会)

2) 石粉と置き換えが想定される競合品

現在、アスファルト・フィラーとして汎用されている石粉等の製品と置き換えが想定される資材について整理し、廃石膏を使用する際の競合品となり得る資材の把握を行った。整理結果を次に示す。

表3.5-5 石粉等と置き換えが想定される資材

製品	概要
電気炉製鋼還元スラグダスト	電気炉の精錬工程において排出されるスラグ
下水汚泥焼却灰	汚泥焼却設備から発生する焼却灰
鋳物ダスト	鋳物工場から排出されるダスト
洗鋳屑	洗鋳過程において排出される屑
ホタテ貝殻粉末	主成分を炭酸カルシウムとする海洋副産物

出典：下水汚泥の建設資材利用マニュアル(案)((社)日本下水道協会)
アスファルト舗装要綱((社)日本道路協会)

第4章 地盤安定化資材としての活用に当たっての環境安全性の検討

廃石膏ボードを土木資材として有効利用する際に、課題として挙げられる環境安全性について検討を行った。廃石膏ボードに関する安全面の課題と対応策については、平成20年度に環境省が行った調査において、表4.1-1のとおり整理されている¹⁾。

表4.1-1 土木資材として廃石膏ボードを利用した際の安全対策¹⁾

安全対策の対象	対象物の概要		解体時の対応可能性	処理時の対応可能性
	有害性	有害となる条件		
アスベスト	呼吸器疾患	主に解体時に飛散する	設計図面等による製造年度での識別やサンプル分析を行っており、大手ゼネコンを中心に既に対応を行っている	-
フッ素	土壌汚染	土壌固化材として利用した場合、基準値以上の溶出が起る場合がある	-	除去・不溶化技術が研究されているが、コスト面で実用段階にない
重金属 (ヒ素・カドミウム)	土壌汚染	土壌固化材として利用した場合、基準値以上の溶出が起る場合がある	重金属含有の石膏ボードの製造年度や、製造場所が限られているため、建物の建設年度や所在地により絞込み可能	重金属の不溶化技術が存在し、また製品製造時の混合により濃度が薄まるため、対応は可能である
硫化水素	有毒ガス発生	嫌気性状態など、限定された条件で発生する	-	酸化鉄の散布など、コスト面も含め実用技術が既にあり、フッ素と同時処理が可能なものなど、より良い処理方法が研究されている

本年度は、石膏ボードに含まれるフッ素、ヒ素及びカドミウムなどの有害物質、ならびに土木工事施工後における環境安全性評価方法として、廃石膏ボードを地盤安定化資材として利用した後の硫化水素の発生に関する環境安全管理方法の検討を行った。土木資材の中で最も多い利用が見込まれる、地盤改良材や土壌改良材などの地盤安定化資材を検討対象とした。なお、本年度報告する環境安全管理方法である確認試験や抑制対策は、正式に基準化・認可されている方法ではなく、管理方法事例として紹介するものである。

【参考文献】

- 1) 平成20年度廃石膏ボードの再資源化促進方策検討業務調査報告書

4.1 地盤安定化資材製造事業者が行っている環境安全性の管理事例

廃石膏を原材料とした地盤安定化資材を製造している事業者に対して、製品である地盤安定化資材の環境安全性をどのように評価しているかヒアリングを行った。ここでは、製造業者の取組を地盤安定化資材の種類ごとにとりまとめることとし、原材料に廃石膏を 100~~100~~%使用している地盤固化材を製造している業者（A社）、石灰と廃石膏を混合させた改良材を製造している業者（B社）の2事例についてとりまとめた。

4.1.1 A社のヒアリング結果

原材料に廃石膏を100%使用した地盤固化材を製造している事業者に対し環境安全性の管理方法として、廃石膏ボードを受け入れる際の管理方法やと、固化材製造時、施工後における管理方法についてヒアリングを行った。ヒアリング結果は次のとおりである。方法を整理した。管理方法は次のとおりである。

(1) 廃石膏ボード受入時の管理方法

A社へのヒアリング結果より、下記の回答を得た。

廃石膏ボードを受け入れる際に、製造年度などの型番を明確に選別することで、ヒ素やカドミウムなどの有害物質を含有している石膏ボードを除外する。由来が明らかでないものは受入を行わない。

紙および接着剤を混入させないように分離を徹底する。また、解体系廃石膏ボードは、解体時に発生する混合廃棄物などの不純物の混合を防ぎ、石膏の品質を確保する。

(2) 製品製造時の管理方法

A社では、製品製造後の段階で、固化材に対する溶出試験を実施して土壤環境基準に適合しているか確認しており、フッ素が環境基準を超過して検出される場合は、フッ素抑制効果のある添加剤を使用することで溶出を抑制する。ヒ素やカドミウムが環境基準を超過して検出される場合は施工に使用しないこととしている。

(3) 施工後の管理方法

A社では、有害物質の溶出及び硫化水素発生の有無を確認するために、施工後のモニタリングを実施しており、モニタリングの対象は、廃石膏を使用する際に特に懸念事項として挙げられる、フッ素の溶出及び硫化水素の発生であった。

施工後のモニタリング頻度は、施工後1年目は1回/2ヶ月、2年目は1回/6ヶ月、3年目は1回/12ヶ月と、モニタリング頻度を施工後の時間とともに減少させ、モニタリング負荷を軽減する試みが行われている。

|

1) A社で実施されているフッ素のモニタリング方法

【採取方法】

採取場所：「5地点混合方法」。

採取深度：改良地盤の上面から10cm～50cm程度の深度。

ボーリング孔から採取する場合は、深度毎のサンプル試料を用いる。

この場合、5点混合法によらず、1深度1試料とする。

試験個数：原則として3試料とする。(不可能な場合は1試料とする。)

試料は、原則として500g～1000gを用いる(乾燥後の試料で最低50gが必要)。

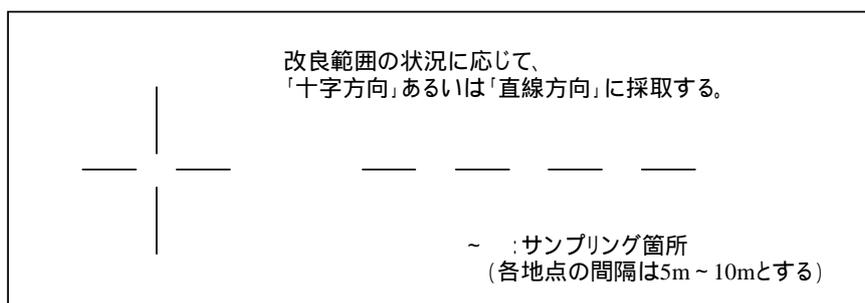


図4.1-1 フッ素モニタリングの試料採取位置

【測定方法】

土壤環境基準の測定方法に準じて実施する。

(3) 施工後の管理方法 2) A社で実施されている硫化水素ガスのモニタリング方法

A社では、硫化水素の判定基準として、悪臭防止法に基づく大気濃度規制値(0.02～0.2ppm)を参考にし、最も小さな濃度である0.02ppmを判定基準とする自己管理を行っている。硫化水素の測定方法に関しては、環境省発行の「悪臭物質簡易測定マニュアルに基づく簡易測定法の活用について(平成2年4月26日環大特58号)」によって実施している。これは検知管を用いた方法であり、ガス吸引器は1回の吸引作業で100mLのガスを吸引し、このときの検出限界濃度が0.2ppmである。そのため、基準値の0.02ppmを判定するため、10回の吸引作業を繰り返し、累積の吸引量が1,000mLとなったときに示す検知管濃度を判定している。1回の吸引作業に要する時間は約2分であることから、1測点の硫化水素濃度を測定するのに約20分間必要になる。また、A社では、硫化水素ガスの人間への曝露経路についても考慮しており、硫化水素ガスの有毒性は人が吸引することによって、初めて有害となることから、地表面付近にて硫化水素濃度を測定することとしている。地盤安定処理された改良土においては、地表面から50cm程度の深さまで塩ビ管を挿入し、地表面に立ち上がった塩ビ管内のガス濃度を測定対象としている。地表面からの立ち上がりについては特に規定を設けていないが、測定しやすい高さとして、塩ビ管上端から0～50cmの深さにあるガス濃度を検知管によって吸引するよう自社基準を定めている。

4.1.2 B社のヒアリング結果

石灰と廃石膏を混合させた地盤改良材の製造事業者に対し環境安全性の管理方法として、廃石膏ボードを受け入れる際の管理方法と、改良材施工前における管理方法についてヒアリングを行った。ヒアリング結果は次のとおりである。

(1) 廃石膏ボード受入時の管理方法

B社へのヒアリングにより、下記の回答が得られた。

「品質を確保するために、受け入れる廃石膏ボードは、新築現場から発生する端材に限定し、由来が明らかでないものや品質の悪い廃石膏ボードの受入を行わない。」

(2) 施工前の管理方法

有害物質の溶出の危険性を抑制するために、施工前の段階で、製品に対してフッ素溶出試験、硫化水素発生確認試験を実施し、環境安全性リスクの確認を実施している。したがって、施工後の現場でのモニタリングは実施していない。

—1) 処理土の安全性試験（溶出試験）

—・実際に改良を行う対象土に地盤安定化資材を添加した処理土を供試体としてフッ素溶出試験を実施し、土壤環境基準に適合しているか確認している。フッ素が基準値を超過する場合は当該現場に当該改良材を用いないようにしている。

—2) 硫化水素発生確認試験

—・実際に改良を行う対象土に廃石膏粉を2%添加したものに、ガラス製の密閉容器に封入した後、硫酸塩還元菌と栄養塩を加え、35℃のインキュベータで28日間静置養生した後、容器内の硫化水素濃度を測定している。硫化水素ガスが発生している場合、当該改良材は使用しない、という自社基準を定めている。

【硫化水素ガス測定方法に関する補足】

ヒアリング結果より得られた廃石膏利用地盤安定処理土の施工後のモニタリングでは、大気による希釈が懸念される。地盤に削孔後、即座に大気と隔離されるように密閉環境をつくらないと、一瞬で大気に希釈されてしまう。また、削孔を実施する段階で既に大気との混合が起こっているため、削孔後、数時間静置した後の孔内ガス濃度を測定することが必要である。ここでは、最終処分場におけるガス放出地点（ホットスポット）の測定や、土壤地下水汚染におけるホットスポットを探索する際に利用されている「君津式表層ガス調査法」（出典：『最終処分場における現場調査法』）について紹介する。

君津式表層ガス調査法とは、埋立地の表面を穿孔し、地下、表層部のガスを検知管等により直接測定する方法である。この方法は、検知管の種類を変えることにより、メタン以外の多様なガスを測定することができ、また埋立地表層部のガス濃度分布を安価に、そして簡単に把握することができる。また、若干高価ではあるが、この用途で用いることができるメタン、二酸化炭素、酸素、硫化水素を同時に測定できるガス濃度測定器も市販されている。さらに、表面が舗装などされている場合でも、穿孔により測定が可能である。この方法は、廃棄物最終処分場の廃止基準で規定されているガス発生量を測定する方法ではないが、覆土層あるいは埋立層内のガス濃度分布が得られ、浅い層の面的なガス発生ポテンシャルを簡易に知ることができるという利点がある。

表層ガス濃度を実施する際に使用する器具は、次のとおりである。

- ・ボーリングバー（穿孔器具）
- ・ステンレス管（希望測定深度に応じて任意）
- ・検知管またはガス濃度測定器（ガス濃度測定器具）
- ・吸引ポンプ（検知管用器具）
- ・穿孔地点を決めるための巻き尺等の計測器

以下に調査手順を、また、次頁図 4.1-2 にその概要を示す。

調査地内を縦横 4m 程度の間隔でメッシュ状に区分する。

ボーリングバーで調査孔を穿孔する。（約 85 cm）

ステンレス管を設置し、周囲・開口部を密閉し、一定時間（数時間）設置する。

ガス採取器等で孔内のガスを採取する。

ガス濃度測定器または検知管の目盛りから濃度を読み取る。

図4.1-2 調査概念図

なお、ガス濃度測定器ならびに検知管は、簡易に測定でき、現場にてその結果が判明するという利便性はあるが、ガスの種類によっては干渉が生じ（例えば、硫化水素とメルカプタン類）、正確な濃度測定ができない場合がある。また、遮水シートが敷設されている処分場では、敷地境界付近でのボーリングバーによる穿孔深度には、シートを破損させないように十分配慮する必要がある。有害物質の溶出及び硫化水素発生の有無を確認するために、施工後のモニタリングを実施する。モニタリングの対象は、廃石膏を使用する際に特に懸念事項として挙げられる、フッ素の溶出及び硫化水素の発生とする。

1) モニタリングの頻度の例

— 施工後のモニタリングの頻度は次のとおりである。—

- 施工後1年目：1回/2ヶ月
- 2年目：1回/6ヶ月
- 3年目：1回/12ヶ月

2) モニタリングの対象

— モニタリングで測定を行う対象は次のとおりである。—

- フッ素
- 硫化水素

3) フッ素のモニタリング方法

【採取方法】

- 採取場所：「5地点混合方法」による。
- 採取深度：改良地盤の上面から10cm～50cm程度の深度である。
- ボーリング孔から採取する場合は、深度毎のサンプル試料を用いる。
- この場合、5点混合法によらず、1深度1試料である。
- 試験個数：原則として3試料とする。（不可能な場合は1試料とする。）
- 試料は、原則として500g～1000gが必要（乾燥後の試料で最低50gが必要）。

図4.1-1 フッ素モニタリングの試料採取位置

4) 硫化水素のモニタリング方法

【基準値】

悪臭防止法に基づく大気濃度規制（基準値：0.02～0.2ppm）から、最も小さな値である0.02ppmを判定基準値とする。

【測定方法】

—硫化水素の測定方法については、環境省発行の「悪臭物質簡易測定マニュアルに基づく簡易測定法の活用について」（平成2年4月26日環大特58号）によるものとする。

—ガス採取器は、1回の吸引で100mlのガスを吸引でき、この時最小の検知できる濃度は0.2ppmである。そのため、基準値の0.02ppm以下の検知を確認するために、10回の吸引を繰返し、1000mlのガスに対するの反応を見る必要がある。ガス検知管の最小目盛り0.2ppm/100mlが0.02ppm/1000mlの精度となる。

——注意：1回の吸引で2分間ほどかかることから、測定に合計20分を要する。

【測定場所】

—硫化水素は、人が吸引して始めて有害となることから、地表付近での濃度を測定する。地盤改良地盤においては、地表下50cm程度の深さまで塩ビ管を挿入し、地表に立ち上がった塩ビ管（測定しやすい高さとする：0cm～50cm程度）の管内にガス検知管の先端を入れ、吸引する。

【測定位置】

—測定位置は、地盤改良の面積にもよるが、原則3箇所とする。（道路改良区間で1箇所以上の測定が不可能な場合を除く。）

図4.1-2 硫化水素モニタリング測定方法



ステンレス管上端



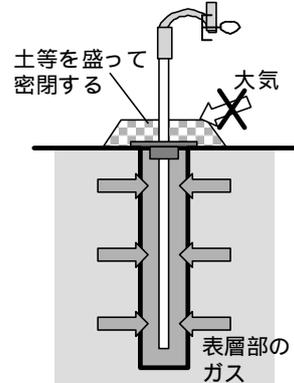
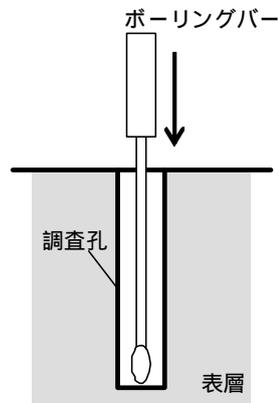
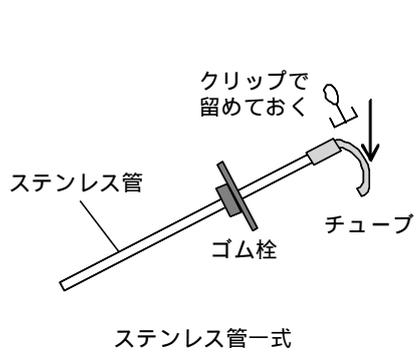
ステンレス管下端



調査孔を穿孔



ステンレス管の設置と
開口部の密閉



実施した確認試験の概要

4.1.3 地盤安定化資材管理方法のヒアリング結果の比較

廃石膏 100%を原材料として使用した製品(A社)と石灰・廃石膏複合改良材製品に対する環境安全性管理方法のヒアリング結果の比較を行った。

表4.1-2 管理方法のヒアリング結果の比較

改良材種類		廃石膏固化材管理方法(A社)	石灰・廃石膏複合改良材管理方法(B社)
施工前	廃石膏ボード受入時の管理方法	製造年月日などの型番を明確に選別することで、ヒ素やカドミウムなどの有害物質を含有している石膏ボードを除外 紙および接着剤を混入させないよう分離を徹底	受け入れる廃石膏ボードを新築現場から発生する端材に限定
	溶出試験	製品製造後の段階で、固化材に対する溶出試験を実施して土壌環境基準に適合しているか確認	施工前の段階でフッ素溶出試験を実施
	硫化水素発生確認試験	-	培養試験により硫化水素ガスの発生有無を確認
施工後	有害物質モニタリング	サンプリング資料に対してフッ素、六価クロムの溶出試験を実施	
	硫化水素モニタリング	現場にて硫化水素発生状況のモニタリングを実施	

4.2 地盤に係る環境安全性管理方法の検討

4.2.1 地盤安定化資材に含有する有害物質に係る検討

地盤安定化資材に含有する有害物質に対する安全性を評価するにあたり、評価試験や対象物質に関する検討項目を抽出した。また、項目ごとに評価基準の整理を行い、対応策について検討を行った。

—環境安全性の観点で、地盤安定化資材に含有する有害物質をどの様に評価すべきか検討を行った。

表 4.2-1 地盤安定化資材に含有する有害物質の検討項目

検討項目		内容
1	環境安全性評価試験の対象について	対象は製品自体とすべきか、施工後の改良土壌とすべきか検討する。
2	評価対象物質	セメント系、石灰系、石膏系の各地盤安定化資材に対する調査対象物質を整理する。
3	必要な試験の種類	評価試験として溶出試験のみで十分か、又は含有試験を並行して実施すべきか検討する。

(1) 評価基準の整理

地盤安定化資材の環境安全性に関する法令・通知などの評価基準及びリサイクル制度の事例について調査を行い、特徴的な4つの事例について整理を行った。

1) 「セメント及びセメント系固化材を地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」旧建設省通知(技調発第48号、H12.3.24)

セメント及びセメント系固化材を施工する場合は、条件によっては添加した改良土から六価クロムが土壤環境基準を超える濃度で溶出するおそれがある。そのため、現地土壌と固化材の混合土壌に対する溶出試験を実施し、土壤環境基準を超過するなどの場合は必要に応じて適切な措置を講じる事とする。

セメント系固化材の中には、セメント・石膏系固化材も含まれることから、セメント・廃石膏系固化材も対象となり、かつ、六価クロムとフッ素についての評価となれば、固化材単体からの溶出量と含有量で評価するのではなく、改良土を対象とした評価も可能であると考えられる。

旧建設省技調発第48号通知(抜粋)

1. セメント及びセメント系固化材を地盤改良に使用する場合、現地土壌と使用予定の固化材による六価クロム溶出試験を実施し、土壤環境基準を勘案して必要に応じ適切な措置を講じること。
2. セメント及びセメント系固化材を使用した改良土を再利用する場合、六価クロム溶出試験を実施し、六価クロム溶出量が土壤環境基準以下であることを確認すること。

2) 愛知県リサイクル資材評価制度

愛知県リサイクル資材評価制度(あいくる)~~(あいくる)~~では、土壌改良材(地盤改良工用)の評価基準として、土壌改良材の原料そのものに対して土壌環境基準の溶出基準、土壌汚染対策法の含有基準の適合を求めており、本節で挙げている事例の中で最も厳しい評価基準となっている。(本基準は平成19年に制定)

表4.2-2 愛知県リサイクル資材評価制度における土壌改良材の評価基準(抜粋)

項目	評価基準内容
評価対象資材	再生資源を原料とした土壌改良材を対象とする。
環境に対する安全性	<p>a.原料および再生資源の原料として、特別管理(一般・産業)廃棄物を使用していないこと。</p> <p>b.地盤改良工用</p> <p>原則として原料(再生資源)が環境基本法第16条第1項による「土壌の汚染に係る環境基準について」(平成3年環境庁告示第46号)及び土壌汚染対策法施行規則第18条第2項のうち、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、セレン、ふっ素及びほう素の基準に適合していること。</p>

3) 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ

(JIS A5032:2006)

一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグの環境安全性評価の考え方として、溶融スラグが利用されたアスファルト成型体やコンクリート成型体等と混合した複合材に対し、土壌環境基準に基づく溶出量基準、及び土壌汚染対策法に基づく含有量基準を満足することを評価の基本的考え方としている。なお、現段階では、安全側の見地に立ち、規格の要件として溶融スラグ単体で土壌環境基準の溶出量基準、及び土壌汚染対策法に基づく含有量基準を満足することを求めており、上記の愛知県リサイクル資材評価制度と同様の考え方となっている。

JIS A5032における環境安全性の基本的考え方(抜粋)

JISの対象用途であるアスファルト混合用と路盤材用の溶融スラグについては、『複合材等の最終製品で、土壌環境基準に基づく溶出量基準、及び土壌汚染対策法に基づく含有量の指定基準を満足すること』を環境安全性の評価の考え方とすることができる。(同解説より引用)

ただし、現段階では、安全側の見地に立って、溶融スラグ単体で土壌環境基準の溶出量基準、及び土壌汚染対策法に基づく含有量の指定基準を満足することを規格の要件としている

4) 土壌の汚染に係る環境基準についての一部改正について

(旧厚生省通知(環水土第44号 H13.3.28))

『道路用等の路盤材や土木用地盤改良材等として利用される場合には、再利用物自体は周辺の土壌と区別できることから、これらには適用しない。』としている。再利用物への土壌環境基準の考え方では、アスファルト混合物と路盤材を土壌とはみなしていない。ただし、路床【路盤材の下部】は周辺土壌と区別できないため、一般土壌として取り扱われる。

表4.2-3 土壌の汚染に係る環境基準についての一部改正について(抜粋)

項目	評価基準内容
再利用物への適用	<p>再利用物への土壌環境基準の適用については、</p> <p>()セメントや石膏ボード等の原材料として利用され、構造物の一部となっている場合には、これらには適用しない。</p> <p>()道路用等の路盤材や土木用地盤改良材等として利用される場合には、再利用物自体は周辺の土壌と区別できることから、これらには適用しない。</p> <p>()肥料のように土壌に混ぜ合わせて使用する場合には、肥料を混合させた土壌には適用する。</p> <p>と解される。また、いずれの場合にも、再利用物の周辺の土壌に対しては土壌環境基準を適用するものとする。</p>
土壌環境基準の項目追加等に伴う留意点	<p>ふっ素及びぼう素については、自然界に広く存在しているものであり、土壌環境基準の適用に当たっては、例えば、地下水面からの距離等を勘案して地下水への影響が生じるおそれがないと判断される場合には3倍値基準を適用するほか、適用対象となる土壌の考え方に留意するなど、土壌環境基準の適切な運用を図る必要がある。</p>

(2) 有害物質への対応策の整理結果

地盤安定化資材を使用する際の、製品に含まれる有害物質の環境安全性に係る検討項目ごとの整理結果を次に示す。

[検討項目1] 試験の対象物について

上記(1)の評価基準の整理結果から、試験の対象物については、「製品自体を対象とする考え」および「地盤安定化資材を添加した改良土を評価対象とする考え」の両方が存在することが明らかになった。次にそれぞれの試験の考え方を示す。

1) 地盤安定化資材(製品)自体に対する試験

地盤安定化資材(製品)自体を対象に、溶出量基準値や含有量基準値に対する適合有無の試験を実施する。基準値との適合が認められる場合、対策を施さずに施工できることとする。この考え方は、製品が単独で一般環境中に放出されたとしても、生活環境上の支障が生じないことを目的としており、安全性を重視した管理方法である。

前述4.1.1のA社のヒアリング結果によると、固化材に対する溶出試験により、フッ素が環境基準を超過する場合は抑制効果のある添加剤を使用している。このような事例を考慮すると、基準値を超過する場合は不溶化処理等の対策を行う必要があり、対策の結果、土壤環境基準値への適合が認められる場合は施工可能とするが、適合が認められない場合は施工できないこととする。

【実施事例】

愛知県リサイクル資材評価制度(地盤改良工用の土壤改良材)

一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を使用した道路用溶融スラグのただし書き

2) 改良土に対する試験

地盤安定化資材(製品)と現地土壌を混合した改良土に対して、溶出量基準値や含有量基準値に対する適合有無の試験を実施する。

【実施事例】

セメント及びセメント系固化材を地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について(セメント及びセメント系固化材を施工する場合の評価基準)

一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を使用した道路用溶融スラグの本文

[検討項目 2] 評価対象物質について

セメント系改良材、石灰系改良材、石膏系改良材の各地盤安定化資材において、含有している物質を整理し、安全性の評価を行う物質の整理を行った。

1) 各種地盤安定化資材に含有する有害物質

地盤安定化資材の安全性評価を行う際の評価対象物質を検討するにあたり、地盤安定化資材ごとに含有している有害物質の整理を行った。

セメント系改良材

・六価クロム：

セメント原料に通常含まれる物質。土とセメントを混合し、固化する過程で、水和反応によりセメントから溶出した六価クロムが同時に生成する水和物で十分固定できなかった場合に発生し、火山灰質粘性土に代表される水和物阻害が著しい土を改良した場合に土壤環境基準を超過して溶出する場合がある。

石膏系改良材

・フッ素：

石膏ボードの原料である天然石膏や化学石膏に通常含まれる物質。不用意に取り込むと人体に悪影響があることから、土壤環境基準、地下水環境基準が定められている。

・ヒ素、カドミウム：

昭和 48 年から平成 9 年頃にかけて一部の工場で製造された石膏ボードに、高濃度のヒ素やカドミウムを含むものが見つかり、問題が顕在化した。

2) 地盤安定化資材ごとの調査物質

セメント系、石灰系、石膏系の各地盤安定化資材に含まれている有害物質の整理結果から判断される調査の対象物質を次に示す。

セメント系改良材

- ・六価クロム、カドミウム、フッ素、ヒ素

石灰系改良材、石膏系改良材

- ・カドミウム、フッ素、ヒ素

[検討項目 3] 必要な試験の種類について

既存の環境安全性に対する基準の整理結果から、試験の種類については、土壤環境基準に基づく溶出量試験のみを実施する場合と、土壤汚染対策法の含有量試験を含めた2つの試験を実施する場合の両方が存在することが明らかになった。

1) 愛知県リサイクル製品認定制度

地盤改良材の原料で次の基準を満足することと規定されている。

土壤環境基準の溶出基準

土壤汚染対策法の含有基準

2) 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化した道路用溶融スラグ（JIS A5032）

溶融スラグ単体において、次の基準を満足することと規定されている。

土壤環境基準に基づく溶出量基準

土壤汚染対策法に基づく含有量の指定基準

上記の整理結果から、次の基準を満足することを評価基準とする。

土壤環境基準に基づく溶出量基準（平成3年8月環境庁告示第46号）

土壤汚染対策法に基づく含有量の基準（平成15年3月環境省告示第19号）

(3) 検討項目ごとの対応策の総括

上述の評価基準を、有害物質に対する環境安全性の検討項目ごとに整理・抽出した結果を次に示す。

表4.2-4 各資材に対する環境安全性の評価方法

	検討項目1 『試験の対象物』	検討項目2 『評価対象物質』	検討項目3 『試験の種類』
セメント系固化材 (旧建設省通知)	土壤と固化材の混合土壤	六価クロム	土壤環境基準に基づく溶出試験
土壤改良材 (愛知県リサイクル資材評価制度あいくる)	土壤改良材	カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、セレン、フッ素、ほう素	土壤環境基準に基づく溶出試験及び土壤汚染対策法に基づく含有試験
道路用溶融スラグ (JIS A5032)	アスファルトやコンクリートとの混合材	基準に基づく指定物質	土壤環境基準に基づく溶出試験及び土壤汚染対策法に基づく含有試験 ^{注1}

注1：土壤環境基準ではアスファルト混合物と路盤材は除外

4.2.2 硫化水素に対する環境安全性に係る検討

硫化水素の発生に対する安全性を評価するにあたり、硫化水素の判定基準、対策方法に関する検討項目を抽出した。また、項目ごとに既存の基準や法令、研究成果を整理し、対応策について検討を行った。ついて調査を行った。硫化水素の安全性に関する検討項目を次に示す。

表4.2-5 硫化水素の安全性に関する検討項目

検討項目		内容
1	発生抑制基準	どの程度の硫化水素濃度に抑制できれば安全か検討する。
2	発生リスク評価	硫化水素の発生可能性の評価方法について検討する。
3	発生抑制対策	発生させない方法及び、発生した場合の抑制方法について検討する。

(1) 既存の基準・法令、研究成果の整理

1) 発生抑制基準について

硫化水素の発生抑制基準を検討するに当たり、硫化水素の濃度における人体への影響及び硫化水素に関する法令の整理を行った。

表4.2-6 硫化水素濃度における影響

濃度(ppm)	部位別作用・反応		
0.025	嗅覚 鋭敏な人は特有の臭気を感じできる(嗅覚の限界) 誰でも臭気を感じできる 不快に感じる中程度の強さの臭気		
0.3			
3~5			
5		許容濃度(日本産業衛生学会)・管理濃度(昭和63年労働省告示第79号)	
10		目の粘膜を刺激下限界	
20~30	耐えられるが臭気の慣れ(嗅覚疲労)で、それ以上の濃度に、その強さを感じなくなる	呼吸器 肺を刺激する最低限界	
50			眼 結膜炎(ガス眼)、眼のかゆみ、痛み砂が目に入った感じ、まぶしい、充血と腫脹、角膜の混濁、角膜破壊と剥離、視野のゆがみとかすみ、光による痛みの増強
100~300	2分~15分で嗅覚神経麻痺で、かえって不快臭は減少したと感ずるようになる。	8~48時間連続暴露で気管支炎、肺炎、肺水腫による窒息死	
170~300		気道粘膜の灼熱的な痛み1時間以内の暴露ならば、重篤症状にならない限界	
350~400		1時間の暴露で生命の危険	
600		30分の暴露で生命の危険	
700	脳神経 短時間過度の呼吸出現後直ちに呼吸麻痺		
800~900	意識喪失、呼吸停止、死亡		
1000	昏倒、呼吸停止、死亡		
5000	即死		

出典：「新酸素欠乏危険作業主任者テキスト」(中央労働災害防止協会)

表 4 . 2 - 7 硫化水素に関する法令の整理

法令等	基準	概要
悪臭防止法に基づく大気濃度規制値 (悪臭防止法施行規則第 1 条)	0.06 - 0.2ppm	工場その他の事業場における事業活動に伴って発生する悪臭原因物の排出(漏出を含む。)規制基準
	0.02 - 0.06ppm	上記以外の場所での規制基準
労働安全衛生法規制値 (許容限界濃度)	5ppm	作業環境中の硫化水素濃度を 10ppm 以下と規制
日本産業衛生学会許容濃度	5ppm	

2) 硫化水素発生条件の整理

硫化水素が発生するためには下記の条件が全てそろふ必要があり、発生条件を欠如させることで発生を抑制することが可能である。

表 4 . 2 - 8 硫化水素発生条件

発生条件
硫酸塩(S)の存在
硫酸塩還元菌の存在
硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在
滞留水の存在
嫌気性の環境の存在(水没状態で酸素のない状態)

3) 硫化水素発生抑制について

硫化水素の発生抑制に対する研究事例の調査を行った。調査結果を次に示す。

TOC (全有機体炭素) と硫化水素生成の関係

表 4.2-8 の硫化水素の発生条件にあるように、硫化水素の発生は有機物の存在と密接な関係がある。次の事例は、建設廃棄物の埋立における硫化水素発生に関する研究であるが、建設廃棄物から溶出する有機物濃度 (TOC) が 25mg/L 以下であれば、硫化水素ガス濃度を急性毒性が現れるレベル 1,000ppm 以下に抑制できることを室内実験により明らかにした。

しかし、この研究事例は埋立層内での埋立管理法における判定条件であり、一般環境においてはより厳しい管理条件が必要となる。

溶出液の TOC が 25mg/L 以下である場合、建設廃棄物からの硫化水素の発生リスクは小さいと考えられる。

TOC 濃度と硫化水素発生の関係 (抜粋)

建設混合廃棄物選別物の埋立に関しては、高いレベルの硫化水素を発生するという観点からは熱灼減量 20% 以下のものに規制すればよく、廃石膏ボード類選別物の埋立に関しては熱灼減量 4% 以下のものに規制すればよい。さらに、共通基準として、廃棄物溶出試験の溶出液 TOC 濃度を 30mg/L 未満に規制すればよい。ただし、これらの廃棄物埋立層に TOC で 30mg/L 以上の浸透水が流入すると、硫化水素ガスが発生すると考えられる。したがって、安定型処分場にこれらの廃棄物を埋めた場合には、浸透水の BOD 基準値 20mg/L (TOC で 25mg/L に相当) を確実に維持する必要がある。硫化物イオン

出典：小野雄策、田中信壽：建設廃棄物埋立における硫化水素ガス発生の可能性と管理法に関する考察、
廃棄物学会論文誌、Vol.14, No.5, pp.248-257(2003)

含鉄資材による硫化水素の発生抑制

鉄などの重金属類と硫化物イオンを反応させて、硫化鉄として土壤中に捕捉することが可能である。

含鉄土壌による硫化水素の発生抑制 (抜粋)

硫化水素イオンが発生した廃石膏ボード 100g に対して、含鉄土壌と含鉄廃棄物を混合して嫌気性培養実験を行った。

その結果、鶴ヶ島 - B 土壌では 10g 以上から、また阿蘇黒ボク土では 5g 以上から硫化水素ガス及び硫化物イオンの発生が抑えられた。さらに、グラインダーダスト及びショットブラストダストを 1g 以上添加すると全ての実験区で硫化物イオンや硫化水素ガスの発生が見られなかった。また、鉄粉廃棄物では有機酸の流出がみられたが、含鉄土壌では有機酸の流出を抑制する効果が確認された。

出典：小野雄策、廃棄物埋立地から発生する硫化水素とその対策、
埼玉県環境科学国際センター講演会資料田中信壽：建設廃棄物埋立における硫化水素ガス発生の可能性と
管理法に関する考察、廃棄物学会論文誌、Vol.14, No. 5, pp.248-257(2003)

(2) 硫化水素への対応策の整理

既往の研究事例等から、硫化水素の発生を判定するための試験や発生抑制方法及び発生した場合の拡散防止方法などの整理を行った。

[検討項目1]発生抑制基準について

硫化水素濃度における人体への影響や、硫化水素に関する法令の整理を行った。硫化水素は環境基準値が設定されていないため、硫化水素の発生抑制基準については、安全側を見据え、『発生抑制の基準としては、安全側を見据え、『硫化水素を発生させないこと』を基準として考えることとする。が基本となると考えられる。しかし、湿田や泥炭地等では自然条件下において硫化水素が発生する事例も存在するため、発生そのものを抑制することが困難な場合も存在する。そのため、具体的な抑制の基準となる濃度については今後、更なる検討が必要であるが、『生活環境に支障を及ぼさない程度の濃度以下に抑制する』ことが必要となる。

[検討項目2]発生リスク評価について

硫化水素の各発生条件において、発生リスク評価の実施可能性の有無について分類し、各発生条件に対する発生リスク評価を行い、発生リスクの確認が可能と考えられる条件について整理した。表4.2-9に各発生条件に対する発生リスク評価実施可能性有無の考え方を示す。

表4.2-9 硫化水素発生条件とリスク評価実施可能性の有無

発生条件	発生リスク評価 実施可能性
硫酸塩(S)の存在	×
硫酸塩還元菌の存在	×
硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在	
滞留水の存在	
嫌気性の環境の存在(水没状態で酸素のない状態)	

1) 硫化水素発生リスク評価が実施可能な条件

硫化水素発生リスク確認が可能と考えられる3つの条件について次に示す。

『硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在』

腐敗しやすい有機物を多量に含む土壌の場合は、硫化水素が発生しやすくなるため、有機物の存在量を測定することで、硫化水素発生リスクを確認する。

『滞留水の存在』

施工する際に、地下水の状況を判断し、水の滞留や嫌気性の環境を生み出さないように留意することで、硫化水素発生リスクを抑制する。

『 嫌気性の環境の存在 』

嫌気性の状況になりうる環境（地形）であるかどうか、周辺地形や水文情報を加味して検討することで、硫化水素発生リスクを抑制する。

2) 硫化水素発生リスク可能性確認方法試験例

上記の3つの発生リスク評価のうち、確認試験として基準化することが可能なものは、『硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在』に対する評価のみと考えられる。有機物の存在量として、溶出液に対する TOC 濃度の測定試験を実施し、硫化水素発生リスクの確認を行う。

【TOC 濃度判定試験】

環境省告示第 13 号による溶出試験液について、TOC (全有機体炭素) 濃度が 25mg/L 以下に管理されていれば、1,000ppm 以上の硫化水素は発生しないという研究成果から、溶出 TOC 濃度をある一定濃度以下に管理することにより、生活環境に支障のないレベルに硫化水素の発生を抑制できることが示唆される。ただし、この方法は急性毒性が現れる硫化水素濃度レベルを 1,000ppm として設定し、その濃度以下に抑制されているかを判断するための試験法であり、安定型処分場などの埋立地での硫化水素の発生を確認することを対象としている。そのため、一般環境中での判定試験方法としては、TOC 濃度基準値を下げるなど、更なる検討を行う必要がある。

[検討項目3]発生抑制対策について

硫化水素の各発生条件において、発生抑制の実施可能性の有無について分類し、各発生条件に対する発生抑制対策の実施可能性の有無を整理した。表 4.2-10 に各発生条件に対する発生抑制対策実施可能性有無の考え方を示す。

表 4 . 2 - 1 0 硫化水素発生条件と抑制対策実施可能性の有無

発生条件	発生抑制対策 実施可能性
硫酸塩(S)の存在	×
硫酸塩還元菌の存在	
硫酸塩還元菌の基質となる有機物の存在	×
滞留水の存在	×
嫌気性の環境の存在(水没状態で酸素のない状態)	×

1) 硫化水素発生抑制対策が実施可能な条件

硫化水素発生抑制対策として可能と考えられる条件について次に示す。

『硫酸塩還元菌の存在』

硫酸塩還元菌の働きを抑制することで、硫化水素の発生を防止する。

2-1) 発生条件を欠如させる抑制方法例

【石灰添加による対策】

石灰を添加することで強アルカリ環境となり、硫酸塩還元菌の生育を阻害し、硫化水素の発生を抑制することが可能である。しかし、近年強アルカリ環境でも活発に生育可能な硫酸塩還元菌が確認されており、強アルカリ制御の信頼性を検討する必要がある。

石灰を添加し、強アルカリ性の環境とすることで、硫酸塩還元菌の抑制が可能となる。これは、硫化水素発生条件、『硫酸塩還元菌の存在』における硫酸塩還元菌の微生物活性を抑制し、硫化水素の発生を抑制するものである。

3-2) 発生した硫化水素に対する拡散防止方法例

【鉄粉等(酸化鉄)の添加による対策】

硫化水素は金属と反応して捕捉されることが知られており、還元時に非結晶性の酸化鉄が溶解して水酸化鉄となり、硫化鉄の沈殿を起こすことで硫化水素を捕捉安定化させることができる。これは、硫化水素発生条件を欠如させる考えとは異なり、発生した硫化水素に対する対策となる。

なお、発生条件 「滞留水の存在」や 「嫌気性の環境の存在」についても、工事現場

の条件によっては、硫化水素の発生抑制が可能であると考えられる。

例．造成工事などで、工事区域全体の地下水位を低下させるために暗渠導水管などが布設された場合

(3) 検討項目ごとの対応策の総括

上述の評価基準を、硫化水素に対する環境安全性の検討項目ごとに整理した結果を次に示す。いずれの検討項目に関しても法的に定められた基準はないため、今後、基準を制定することも視野に入れて総括を行った。

表 4.2-11 検討価値のある各資材に対する環境安全性の評価方法各資材に対する環境安全性の評価方法

検討項目 1 『発生抑制基準』	検討項目 2 『発生リスク評価』	検討項目 3 『発生抑制対策』
生活環境に支障を及ぼさない濃度以下に抑制すること発生させないことを基本とする	【発生リスク確認試験】 溶出液に対する TOC 濃度判定試験を実施し、硫化水素発生リスクの確認を行う。	【発生抑制対策】 発生条件を欠如させる抑制方法 ・石灰添加による対策 発生した硫化水素に対する拡散防止方法 ・鉄粉等（非結晶性酸化鉄）の添加による対策

4.3 環境安全性の評価及び評価手法の検討

前述の製造業者に対する管理方法のヒアリング結果や既存の各種基準の整理結果を踏まえ、廃石膏を使用した地盤安定化資材を使用する際の、有害物質と硫化水素に対する安全性評価手法案を以下に提案する。なお、現段階では評価手法の案文であり、今後、更なる検討と基準の考え方や分析、評価手法に対する精緻化が必要であることを前置きする。

4.3.1 地盤安定化資材に含有する有害物質の安全性判定方法案

[試験の対象物]

地盤安定化資材自体に対する試験と、改良した土壌（処理土）に対する試験の2つの考え方があるが、ここでは安全側の評価を実施するために、地盤安定化資材自体（製品）に対して評価を行うことを基本とする。基準値を超過する場合は、不溶化処理等（キレート材や塩化鉄の添加）の対策を施し、安全性が確認された後に利用できることとする。

[必要な試験の種類]

次の2つの試験を実施し、基準値に適合することとする。

- ・ 土壤環境基準に基づく溶出量測定（平成3年8月環境庁告示第46号）
- ・ 土壤汚染対策法に基づく含有量測定（平成15年3月環境省告示第19号）

[地盤安定化資材の種類による調査対象物質]

セメント系、石灰系、石膏系の各種地盤安定化資材において、次の物質について試験を行うこととする。

(1) セメント系改良材

- ・ 六価クロム、カドミウム、フッ素、ヒ素

(2) 石灰系改良材

- ・ カドミウム、フッ素、ヒ素

(3) 石膏系改良材

- ・ カドミウム、フッ素、ヒ素

4.3.2 硫化水素に対する安全性判定方法案

[発生抑制基準]

硫化水素ガスは一般土壌中でも発生する可能性があり、湿地等においても恒常的に発生していることが考えられる。硫化水素ガスの発生量をゼロとすることは、一般土壌環境よりも厳格な規定を設けることになり、合理的とは言えない。そのため、開発行為に伴う環境保全としてとらえ、生活環境に支障を及ぼさない程度の濃度以下に抑制することを安全性評価の基本とすることが考えられる。下記の5条件が全て満足した場合発生するため、いずれか一つでも欠ければ硫化水素は発生しないため、硫化水素は『発生させないことを基準』として評価を行う。

[発生抑制対策]

(1) 硫化水素発生リスク確認試験

【TOC 濃度試験】

環境省告示第13号による溶出試験液について、TOC(全有機炭素)濃度を一定基準以下(安定型処分場の場合は25mg/L以下)に抑えることで、硫化水素の発生を抑制することが可能という報告があることから、施工前にTOC濃度を測定して硫化水素発生リスクの確認を行うことが考えられる。試験の結果、リスクが無いと判断される場合は硫化水素発生リスクが小さい材料と判断され、利用を認める。この場合でも、硫化水素発生抑制対策を実施した上で施工する。ただし、施工後のモニタリングの実施有無は、安全性が十分に確保できるかどうかを検討した上で判断する必要がある。

(2) 硫化水素発生リスク抑制対策

1) 施工場所の限定

→ 廃石膏を使用した地盤安定化資材を施工する際は、『滞留水の存在』や『嫌気性の環境の存在』が硫化水素発生要因となるため、次の点に留意して施工場所を評価することが必要である。

地下水の存在状況を判断し、水が滞留する環境や嫌気性の環境を生み出す環境であるか検討を行う。その際、地下水の影響や嫌気性環境になる可能性があるならば、それら要因を除外する対策を施す必要がある。

嫌気性環境になる地形であるかどうか、周辺地形や水文情報を加味して施工を検討する。その際、当該土地の所有者や近隣住民に対するヒアリング等も有効な手段と考えられる。

2) 混合改良材による発生抑制

硫化水素の発生確認試験において、発生のおそれがあると判断された場合は、次の地盤改良材と混合して廃石膏を用いることで硫化水素の発生を抑制することが可能である。

消石灰、生石灰、セメント等と石膏の混合改良材を利用することで硫酸塩還元菌の働きを抑制することができる。

石灰を添加することで高強アルカリ環境となることからになり、硫酸塩還元菌の働きを抑制することが可能

硫化水素固定材鉄粉等（非結晶性の酸化鉄等）の添加による対策

硫化水素と反応し、拡散を防止する（発生条件を欠如させる対策以外の方法）

廃石膏を使用した地盤改良材による施工を行う際には、硫化水素の発生リスクを極力抑えることが望ましい。そのため、地盤安定化資材を施工する場合は、滞留水の存在や嫌気性の環境など施工場所や条件に十分留意した上で、添加材による発生抑制を施すなど、複数の発生抑制対策を施すことが望ましい。特に、腐敗性の有機物を多量に含む場合は、硫酸塩還元菌の基質となる有機物が含有されている可能性があり、かつ、石膏添加によって硫酸根も多量に含有することになるため、廃石膏のみならず新材石膏の利用も避けるべきである。